

**М.Ф.Евсюков, Ж.А.Деметьева, Д.В.Лошкарев**

**О КИНЕТИКЕ БЕЙНИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ АУСТЕНИТА В  
СТАЛЯХ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ В ПОТОКЕ  
ПРОИЗВОДСТВА**

*Институт черной металлургии НАН Украины*

Целью исследования является изучение влияния скорости охлаждения в низкоуглеродистых сталях на кинетику распада аустенита на бейнит. Показано, что в реальных условиях производства бейнитная структура в металлопрокате при термической обработке сталей формируется в виде узкой полосы в интервале скоростей охлаждения, обеспечивающих распад аустенита по смешанной кинетике. Максимальное содержание бейнита в металлопрокате независимо от содержания углерода и легирующих элементов не превышает 60-80%.

**Ключевые слова:** низкоуглеродистая сталь, скорость охлаждения, распад аустенита, бейнит

**Состояние вопроса и задачи исследования.** К наиболее желательным типам микроструктур, которые гарантированно обеспечивают металлопрокату высокий уровень конструктивной прочности относятся феррито-бейнитные, феррито-мартенситные и бейнитные, в том числе стали со структурой игольчатого феррита [1]. При этом бейнитные структуры, образующиеся при термической обработке металлопроката в виде листа и арматуры, обладают хорошим сочетанием прочностных и пластических свойств. Как правило, они образуются в среднем районе температур в интервале скоростей охлаждения обеспечивающих распад аустенита по смешанной кинетике. В верхнем районе температур выше 550<sup>0</sup>С аустенит распадается по диффузионной кинетике с образованием  $\alpha$ -фазы в виде безуглеродистого феррита и перлита. При более низких температурах вплоть до температуры начала мартенситного превращения из пересыщенного углеродом аустенита образуются бейнитные структуры в виде верхнего и нижнего бейнита. При температурах ниже 550<sup>0</sup>С в процессе охлаждения аустенита образуется верхний бейнит в виде пакетов, состоящих из параллельно расположенных реек.[2] При температурах выше мартенситной точки  $M_n$  образуется нижний бейнит, имеющий отчетливо выраженное игольчатое строение. В этом случае превращение матрицы – железа происходит по сдвиговому механизму с групповым перемещением атомов железа в решетке аустенита при температурах ниже температуры порога рекристаллизации. [2]. При этом В.Д.Садовский установил, в свое время, ведущую роль ферритной фазы в низкоуглеродистых сталях при распаде аустенита в промежуточном районе температур [3]. Феррит промежуточных структур является пересыщенным твердым раствором углерода в железе. Так при температуре 400<sup>0</sup>С содержание углерода равно

0,1%, а уже при 300<sup>0</sup>С содержание углерода увеличивается до 0,2%. При этом повышение твердости металлопроката в промежуточной области температур обусловлено, в основном, увеличением концентрации углерода в пересыщенном феррите при одновременном уменьшении количества пластинчатого цементита и его размеров. Второй особенностью бейнитного превращения является скачкообразное изменение межпластиночного расстояния цементита по сравнению с перлитом при одинаковых температурах распада.[4]. Изменение размера зерна аустенита по сравнению с перлитом слабо влияет на кинетику протекания бейнитного превращения [5]. При этом повышение температуры нагрева оказывает влияние на морфологию и дисперсность бейнита, в основном, за счет гомогенизации аустенита по углероду и примесям. Третьей особенностью промежуточного превращения является появление на поверхности нетравленного шлифа игольчатого микрорельефа [5]. При этом, игольчатое образование  $\alpha$ -фазы (феррита бейнита) когерентно связано с кристаллической решеткой исходного аустенита. Так для верхнего района температур 350-500<sup>0</sup>С промежуточной области в углеродистой стали было найдено [7], что между решетками игольчатого феррита и аустенита существует ориентационная связь по Нишияма: плоскость (111) аустенита параллельна плоскости (110) феррита и направление [112] аустенита параллельно направлению [011] феррита бейнита. При этом было экспериментально установлено, что процесс превращения металлической основы стали в промежуточном районе температур носит бездиффузионный характер превращения. В отличие от мартенситного превращения он связан с диффузионным перемещением углерода, который за счет пересыщения трансформируется в цементит или приводит к обогащению остаточного аустенита. Частично обедненный углеродом аустенит распадается по сдвиговому механизму с образованием игл и пакетов бейнита.

Однако общие закономерности распада аустенита на бейнит не дают представления о кинетике формирования данной структуры в металлопрокате, имеющем различную скорость охлаждения по сечению изделия [8, 9]. Максимальная скорость охлаждения наблюдается в поверхностном слое проката. С удалением от поверхности к центру скорость охлаждения понижается [10]. В этом случае каждый слой металлопроката охлаждается со своей скоростью, что и приводит к образованию различных структур при распаде переохлажденного аустенита [11].

Кинетика образования бейнитной структуры в сталях в процессе термической обработки зависит от многих факторов, в том числе от скорости охлаждения, степени и характера легирования, температурно-временных условий нагрева, химической неоднородности и других факторов. Рассмотрим влияние скорости охлаждения на температурно-временные параметры распада аустенита низкоуглеродистых сталях после

отдельного нагрева с образованием бейнита. Особое внимание будет уделено влиянию неоднородности скорости охлаждения по сечению металлопроката на степень распада аустенита на бейнит в различных слоях металлопроката с учетом его масштабного фактора и охлаждающих свойств жидкой среды. Это позволит прогнозировать образование бейнитных структур и механические свойства в металлопрокате при термической обработке в потоке производства.

**Целью настоящего исследования** является изучение влияния скорости охлаждения в низкоуглеродистых сталях строительного назначения на кинетику распада переохлажденного аустенита на бейнит с определением интервалов скоростей охлаждения, его содержания при распаде по смешанной кинетике. На основании этих результатов выполнена оценка послойного распада аустенита с образованием бейнита в металлопрокате, имеющем разную скорость охлаждения в процессе термического упрочнения.

**Материал и методика исследования.** Исследования проводили на толстолистовой стали 10Г2ФБ промышленной плавки следующего хим. состава: 0,09 % С, 1,683 % Мп, 0,18 % Si, 0,006 % Мо, 0,088 % V, 0,022 % Nb. Сравнительные исследования проводили также на низкоуглеродистой стали Ст.3, 09Г2С и среднеуглеродистой стали 35ГС. Исследование кинетики распада в большом интервале скоростей охлаждения проводили на дилатометрах АД-80 и МД-83 конструкции Института черной металлургии. В этом случае образцы стали 10Г2ФБ нагревали до 1000<sup>0</sup>С и выдерживали в течении 5 мин. После этого образцы охлаждали по программе: в печах с различной тепловой инерцией, на воздухе, под вентилятором, в масле и в воде. В процессе охлаждения температура образца регистрировалась на приборе КСП-4, а дилатограммы - на приборе ПДП4-002. По термограмме определяли среднюю скорость охлаждения и его температуру, по перегибам на дилатограммах – температуру начала и конца фазового превращения.

Строение продуктов распада и их количественное содержание в исследуемых образцах изучали на дилатометрических образцах в поперечном сечении после различных скоростей охлаждения микроструктурным методом на микроскопе НЕОФОТ-2 после травления 4% ниталем. Балл перлита и соотношение структурных составляющих оценивали также и по ГОСТ 8233.

Результаты дилатометрических и микроструктурных исследований обобщены и представлены в виде термокинетической (рис.1) и структурной (рис.2) диаграммы.

**Результаты исследования.** Критические точки стали 10Г2ФБ при нагреве со скоростью 400<sup>0</sup>С/час равны:  $A_{c1} = 730^{\circ}C$ ,  $A_{c3} = 875^{\circ}C$ .

Аустенит исследуемой стали 10Г2ФБ после отдельного нагрева до 1000<sup>0</sup>С и выдержки 5 мин. в зависимости от скорости охлаждения распадается с образованием следующих структур (рис.1).

При всех скоростях охлаждения ниже  $60^{\circ}\text{C}/\text{с}$  распад аустенита начинается по диффузионной кинетике с образованием структурно свободного феррита. Оставшийся аустенит при скоростях охлаждения ниже  $7^{\circ}\text{C}/\text{с}$  распадается на перлит различной дисперсности.

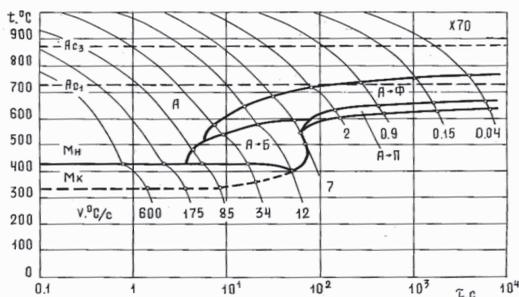


Рис. 1. Термокинетическая диаграмма превращения аустенита стали 10Г2ФБ после отдельного нагрева  $1000^{\circ}\text{C} - 5$  мин.

Бейнитные структуры образуются при температурах  $600-430^{\circ}\text{C}$  в интервале скоростей охлаждения от  $154^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до  $5,5^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . Максимальное количество бейнита, равное 60-70%, образуется в интервале скоростей охлаждения от  $12^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до  $34^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . При этом, в интервале скоростей охлаждения от  $7^{\circ}\text{C}/\text{с}$  и до  $12^{\circ}\text{C}/\text{с}$  бейнит имеет как пластинчатое, так и зернистое строение. С увеличением скорости охлаждения до  $85^{\circ}\text{C}/\text{с}$  бейнит приобретает, в основном, игольчатое строение.

Бейнитно-мартенситная структура образуется в интервале скоростей охлаждения от  $154^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до  $60^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . При этом, количество бейнита увеличивается от нуля до 20-25%. С уменьшением скорости охлаждения до  $12^{\circ}\text{C}/\text{с}$  в бейнитно-мартенситной структуре появляется структурно свободный феррит за счет распада аустенита по диффузионной кинетике. При этом количество феррита увеличивается до 30%, а количество мартенсита уменьшается с 80% до нуля. В интервале скоростей охлаждения от  $12^{\circ}\text{C}/\text{с}$  и до  $7^{\circ}\text{C}/\text{с}$  аустенит распадается с образованием только феррита и бейнита. В этом случае количество бейнита при  $7^{\circ}\text{C}/\text{с}$  уменьшается до 50%, а количество феррита увеличивается до 45-50%

При скоростях охлаждения ниже  $2^{\circ}\text{C}/\text{с}$  аустенит распадается только по диффузионной кинетике с образованием структурно свободного феррита и перлита различной дисперсности. Феррит, в основном, имеет равноосную форму, но с большой разнорзернистостью, а перлит выделяется, в основном, в ликвационных полосах. При скоростях охлаждения выше  $154^{\circ}\text{C}/\text{с}$  в интервале температур  $430-340^{\circ}\text{C}/\text{с}$  переохлажденный аустенит превращается в мартенсит игольчатой формы. Остаточный аустенит методом световой микроскопии не выявлен.

Таким образом, бейнитная структура в стали 10Г2ФБ с содержанием 0,09% углерода образуется в интервале температур  $600-430^{\circ}\text{C}$  и в

интервале скоростей охлаждения от  $154^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до  $5,5^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , что совпадает с интервалом распада аустенита по смешанной кинетике. Максимальное количество бейнита, равное 60-70%, образуется в интервале скоростей охлаждения от  $12^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до  $34^{\circ}\text{C}/\text{с}$ .

С целью определения влияния содержания углерода и легирующих элементов таких как марганец и кремний аналогичные исследования были выполнены на ряде сталей с максимальным содержанием углерода, равном 0,46%. Так в низкоуглеродистой стали Ст.3 с содержанием углерода 0,21% и содержанием марганца 0,50% после отдельного нагрева  $920^{\circ}\text{C}$  – 10 мин. бейнитное превращение протекает в интервале скоростей охлаждения от  $280^{\circ}\text{C}/\text{с}$  и до  $6^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , что практически полностью совпадает с интервалом скоростей распада аустенита по смешанной кинетике. При этом температура начала бейнитного превращения зависит от скорости охлаждения. Так при скорости охлаждения  $280^{\circ}\text{C}/\text{с}$  температура начала бейнитного превращения равна  $500^{\circ}\text{C}$  в то время как при минимальной скорости охлаждения, равной  $6^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , она равна  $570^{\circ}\text{C}$ . При этом в интервале скоростей охлаждения от  $20^{\circ}\text{C}/\text{с}$  и до  $6^{\circ}\text{C}/\text{с}$  наблюдается повышенная устойчивость аустенита – происходит торможение распада переохлажденного аустенита. Температура торможения распада максимальная при скорости охлаждения  $6^{\circ}\text{C}/\text{с}$  и равна  $470^{\circ}\text{C}$ .

С повышением содержания углерода в стали 35ГС до 0,36% и при легировании 0,98% Mn и 0,63%Si после нагрева  $880^{\circ}\text{C}$ - 10 мин. интервал скоростей охлаждения, обеспечивающий распад аустенита на бейнит, уменьшается от  $120^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до  $2,2^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . Понижается и температура начала распада аустенита на бейнит до  $540^{\circ}\text{C}$ . При этом в интервале скоростей охлаждения от  $120^{\circ}\text{C}/\text{с}$  и до  $28^{\circ}\text{C}/\text{с}$  переохлажденный аустенит распадается на бейнит в промежуточном интервале температур. При меньших скоростях охлаждения ниже  $28^{\circ}\text{C}/\text{с}$  и до  $2,2^{\circ}\text{C}/\text{с}$  бейнит распадается в интервале скоростей охлаждения, обеспечивающего распад аустенита по смешанной кинетике. При температурах ниже  $700^{\circ}\text{C}/\text{с}$  распад аустенита начинается по диффузионной кинетике с образованием феррита и перлита ниже температуры  $620^{\circ}\text{C}$ . В интервале скоростей охлаждения от  $10^{\circ}\text{C}/\text{с}$  и до  $2,2^{\circ}\text{C}/\text{с}$  распад аустенита в промежуточной области тормозится. Максимальная температура торможения распада наблюдается при минимальной скорости охлаждения  $2,2^{\circ}\text{C}/\text{с}$  и равна  $480^{\circ}\text{C}$ . Явление торможения распада аустенита автором было выявлено ранее и на сталях 20ГС, 28С и стали 28С2. Аналогичные результаты были получены на стали 20Г [12] с содержанием углерода 0,19% и повышенным содержанием марганца, равном 1,20%. В этом случае температура начала торможения аустенита при скорости охлаждения  $1,2^{\circ}\text{C}/\text{с}$  равна  $490\text{-}500^{\circ}\text{C}$ .

С повышением содержания углерода в стали до 0,46% и при легировании 1% Mn и 0,10%V после нагрева  $850^{\circ}\text{C}$  – 10мин эффект торможения распада аустенита в промежуточной области усиливается.

Эффект торможения начинает проявляться при скорости охлаждения  $35^{\circ}\text{C}/\text{с}$  при температуре  $350^{\circ}\text{C}$ , а с уменьшением скорости охлаждения до  $6^{\circ}\text{C}/\text{с}$  температура начала торможения распада аустенита повышается до  $470^{\circ}\text{C}$ .

В промежуточной области температур от  $520^{\circ}\text{C}$  и до температуры начала мартенситного превращения равной  $290^{\circ}\text{C}$  аустенит распадается с образованием бейнита и фактически на 80-90% совпадает с интервалом распада аустенита по смешанной кинетике.

Таким образом, распад аустенита на бейнит протекает в интервале скоростей охлаждения, совпадающем с интервалом скоростей охлаждения распада аустенита по смешанной кинетике. При этом, температура начала распада аустенита на бейнит понижается до  $500-520^{\circ}\text{C}$ , а интервал скоростей охлаждения с увеличением содержания углерода в стали от 0,09% и до 0,48- 0,56% уменьшается почти в 2 раза. На основании анализа диаграмм различных авторов [12] предельно минимальный интервал распада аустенита по смешанной кинетике и образованием бейнита наблюдается в эвтектоидной стали со структурой перлита. Легирующие элементы, повышающие устойчивость аустенита при охлаждении, смещают интервал скоростей распада по смешанной кинетике с образованием бейнита в сторону еще более низких скоростей охлаждения. В серых чугунах со структурой перлита влияние легирующих элементов аналогичное.

Максимальное содержание бейнита при распаде в интервале скоростей охлаждения по смешанной кинетике зависит как от содержания углерода и легирующих элементов, так и от температурно-временных режимов нагрева и охлаждения. Соотношение структурных составляющих, в том числе и бейнита исследовали на структурных диаграммах, построенных по данным дилатометрических и микроструктурных исследований. Соотношение структурных составляющих определяли с помощью метода случайных секущих по Салтыкову С.А. [13] и по ГОСТ 8233-56.

Построена структурная диаграмма превращения аустенита низкоуглеродистой стали 10Г2ФБ после нагрева до  $1000^{\circ}\text{C}$  и выдержки 15 мин (рис.2). Анализ структурной диаграммы показал, что при скоростях охлаждения  $2^{\circ}\text{C}/\text{с}$  и ниже микроструктура образца состоит из 84 % феррита 16 % перлита. При скорости охлаждения  $7^{\circ}\text{C}/\text{с}$  микроструктура состоит уже из 50% бейнита и 50% феррита. С увеличением скорости охлаждения до  $12^{\circ}\text{C}/\text{с}$  количество бейнита увеличивается до 70%, а количество феррита уменьшается до 30%. При скорости охлаждения  $34^{\circ}\text{C}/\text{с}$  выделяется не более 6% феррита, количество бейнита в структуре уменьшается до 52%, а оставшийся аустенит распадается с образованием 88% мартенсита. При скоростях охлаждения выше  $150^{\circ}\text{C}/\text{с}$  микроструктура состоит из 100% мартенсита.

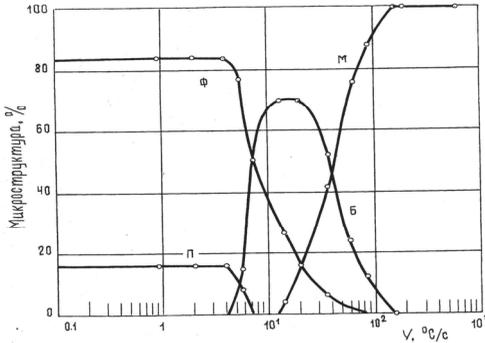


Рис.2. Структурная диаграмма превращения аустенита стали 10Г2ФБ после нагрева 1000<sup>0</sup>С – 15 мин. (X70).

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что бейнитные структуры образуются в интервале скоростей распада по смешанной кинетике от 150<sup>0</sup>С/с до 5,5<sup>0</sup>С/с. Содержание бейнита в стали является функцией скорости охлаждения. Максимальное содержание бейнита в структуре образца, равное 70% , образуется при охлаждении в интервале скоростей охлаждения от 12<sup>0</sup>С/с до 20<sup>0</sup>С/с.

Понижение температуры нагрева оказывает существенное влияние на содержание бейнита в стали. Так в стали 09Г2С с 0,10%С, легированной 1,50%Мн, после нагрева до более низкой температуры равной 920<sup>0</sup>С с выдержкой 10 мин и последующем охлаждении со скоростью 18<sup>0</sup>С/с максимальное содержание бейнита составляет всего 30%.

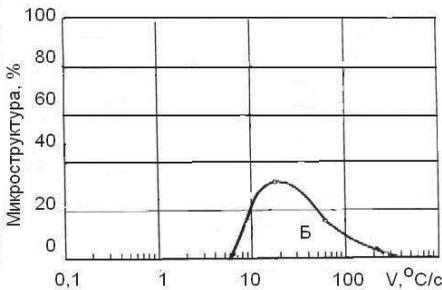


Рис.3. Влияние скорости охлаждения на содержание бейнита в стали 09Г2С после нагрева 930<sup>0</sup>С – 10 мин и последующего охлаждения со скоростью 18<sup>0</sup>С/с.

При этом кривая содержания бейнита в зависимости от скорости охлаждения в пределах интервала скоростей охлаждения распада по смешанной кинетике не симметрична. Увеличение скорости охлаждения от 18<sup>0</sup>С/с до 55<sup>0</sup>С/с приводит к уменьшению содержания бейнита до 13% и только дальнейшее повышение скорости охлаждения до 280<sup>0</sup>С/с приводит к понижению содержания бейнита в стали до нуля .

Повышение содержания углерода в стали также приводит к уменьшению содержания бейнита в интервале скоростей охлаждения по смешанной кинетике. Исследование выполнено на среднеуглеродистой стали 35ГС с содержанием марганца 0,93% и кремния 0,63%. Так, после

нагрева до  $880^{\circ}\text{C}$  – 10мин. распад аустенита на бейнит также как и на предыдущих сталях протекает в интервале скоростей по смешанной кинетике. При этом первые пакеты бейнита появляются при скорости охлаждения  $2,5^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . С увеличением скорости охлаждения количество бейнита в структуре образцов увеличивается и при скорости охлаждения  $6^{\circ}\text{C}/\text{с}$  максимально и равно 42%. Количество феррита уменьшается до 20%, а перлита до 5%. Содержание мартенсита увеличивается до 44%. При дальнейшем повышении скорости охлаждения до  $17^{\circ}\text{C}/\text{с}$  количество бейнита в структуре уменьшается до 23%. При этом количество феррита также уменьшается до 7%, а количество мартенсита наоборот увеличивается до 70%. Дальнейшее увеличение скорости охлаждения до  $65^{\circ}\text{C}/\text{с}$  приводит уменьшению содержания бейнита в структуре образца до нуля, в то время как содержание мартенсита увеличивается до 100%. Таким образом, в данной стали максимальное количество бейнита равно 42% образуется при термической обработке и только в интервале скоростей охлаждения распада аустенита по смешанной кинетике.

Полученные результаты исследования влияния скорости охлаждения на кинетику распада аустенита после отдельного нагрева позволяют прогнозировать кинетику распада аустенита в листе в потоке производства.

При термической обработке в зависимости от скорости охлаждения, масштабного фактора и степени легирования возможны три варианта формирования структуры по толщине листа.

При термической обработке толстых листов стали 10Г2ФБ в потоке производства поверхностные слои охлаждаются в широком интервале скоростей охлаждения от  $154^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до  $5,5^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . В этом случае в приповерхностном слое формируется структура по смешанной кинетике с образованием бейнита. Внутренние слои аустенита при скоростях ниже  $5,5^{\circ}\text{C}/\text{с}$  будут распадаться по диффузионной кинетике с образованием структурно свободного феррита и перлита с учетом текстуры деформации при горячей прокатке, ликвации по углероду и легирующим элементам, образующейся в процессе кристаллизации слитка.

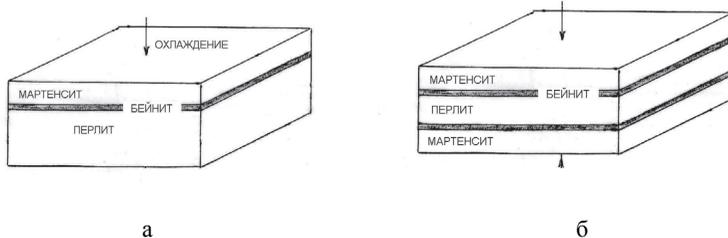


Рис.4 Схема формирования бейнитного слоя в толстом листе при одностороннем (а) и двухстороннем (б) охлаждении водой при термообработке.

С увеличением скорости охлаждения в закалочном устройстве более тонких листов (второй вариант) поверхностные слои металла будут охлаждаться со скоростью более  $154^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . При одностороннем охлаждении водой переохлажденный аустенит будет превращаться по сдвиговому механизму с образованием мартенсита (Рис.4а). В более глубоких слоях, охлаждающихся в интервале скоростей от  $32^{\circ}\text{C}/\text{с}$  и до  $5,5^{\circ}\text{C}/\text{с}$  будет формироваться в основном бейнитная структура. Кроме этого будут присутствовать участки феррита, перлита и мартенсита, соотношение которых будет зависеть от конкретной скорости охлаждения. Центральные и поверхностные слои противоположной стороны листа в процессе термической обработки за счет распада переохлажденного аустенита по диффузионной кинетике будут иметь структуру феррита и перлита различной дисперсности (рис.4,а). При двухстороннем охлаждении листа, что наиболее часто применяется на практике, образуется два бейнитных слоя на одинаковой глубине от каждой поверхности листа. В этом случае поверхностные слои будут иметь одинаковую структуру – мартенсит, а центральные слои будут состоять из феррита и перлита (рис.4,б). Глубина и ширина бейнитного слоя будет зависеть при одинаковой скорости охлаждения, в основном, от толщины листа и характера и степени легирования элементами повышающими устойчивость переохлажденного аустенита.

При термической обработке арматуры цилиндрической формы поверхностные слои аустенита (рис.5,а) при скоростях охлаждения выше  $2,5^{\circ}\text{C}/\text{с}$  превращаются на мартенсит, подвергающийся последующему самоотпуску с сохранением ориентации карбидных частиц по бывшим пластинам мартенсита.

Промежуточный слой состоящий, в основном, из верхнего бейнита [14] формируется в интервале скоростей охлаждения от  $2,5^{\circ}\text{C}/\text{с}$  и до  $65^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . На фотографии и схеме он виден в виде темного кольца на определенной глубине. Слой распространяется по всей длине арматуры (рис.5,б). Кроме бейнита при дальнейшем охлаждении в интервале температур  $340\text{-}230^{\circ}\text{C}/\text{с}$  остаточный аустенит превращается по сдвиговому механизму с образованием игольчатого мартенсита. В процессе дальнейшего охлаждения мартенсит подвергается самоотпуску. Аустенит центральных слоев арматуры при скорости охлаждения ниже  $2,5^{\circ}\text{C}/\text{с}$  распадается по диффузионной кинетике с образованием структурно свободного феррита и перлита. Однородность травления арматуры в поперечном сечении в 4% нитала свидетельствует о том, что и бейнит промежуточного слоя подвергается самоотпуску.

Полученные результаты хорошо согласуются с ранее выполненными работами. Так в работах Wever F и Rose A. [15] было изучено и показано, что бейнитный интервал распада аустенита зависит от содержания углерода. В низкоуглеродистых малолегированных сталях первые фрагменты бейнита образуются уже при температурах  $620\text{-}600^{\circ}\text{C}$ . С

повышением содержания углерода до 0,8% температура начала образования бейнита понижается до 520-500<sup>0</sup>С. Однако, независимо от содержания углерода и легирующих элементов распад аустенита на бейнит происходит, в основном, в интервале скоростей охлаждения, обеспечивающего распад аустенита по смешанной кинетике. Содержание бейнита может достигать не более 60-80% и зависит от содержания углерода, характера легирования и температуры нагрева [16].

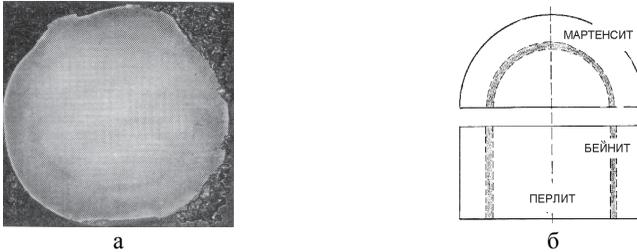


Рис.5. Структурные слои в поперечном и продольном направлениях в арматуре стали 35ГС после упрочняющей термической обработке в потоке стана. а – поперечное сечение, б – схема.

Механизм процессов происходящих при распаде аустенита на бейнит был обобщен в работе Р.И. Энтина [17]. Бейнитное превращение включает следующие основные процессы. В интервале температур бейнитного превращения феррит образуется по мартенситному механизму. При этом, при бейнитном превращении пластины (иглы)  $\alpha$ -фазы растут сравнительно медленно. Это объясняется тем, что в промежуточном интервале температур  $\alpha$ -фаза образуется из  $\gamma$ -фазы, обедненной углеродом, и, следовательно, скорость роста кристаллов  $\alpha$ -фазы контролируется скоростью диффузионного отвода атомов углерода. При более высоких температурах 400-500<sup>0</sup>С из пересыщенного аустенита предварительно выделяются частицы цементита на границах ферритных кристаллов, образующих пакеты верхнего бейнита. При этом, происходит перераспределение углерода в аустените с обогащением приграничных участков, в которых со временем выделяются дисперсные частицы цементита когерентно связанные с  $\alpha$ -фазой. При низких температурах, когда углерод менее подвижен, переохлажденный аустенит распадается по мартенситной кинетике. Потом происходит выделение карбидных частиц внутри пластин  $\alpha$ -фазы. Такая структура имеет в основном игольчатое строение и классифицируется как нижний бейнит [18].

Легирующие элементы, растворенные по способу замещения, не успевают перераспределяться, поэтому содержание их в феррите и аустените одинаково. В остальных объемах температура начала распада остаточного аустенита на мартенсит за счет повышения содержания углерода понижается. Позже эти процессы были подробно описаны в

работах Гуляева А.П. [8], Блантера М.Е. [4]. Закономерности формирования морфологии бейнитной структуры в сталях различного назначения подробно описаны в работе Bhadesha [19]. Изучены и описаны закономерности формирования игольчатого феррита. Закономерности формирования природы игольчатого феррита в низкоуглеродистых сталях отечественного производства в настоящее время изучаются школой академика Большакова В.И. Однако сведения о кинетике формирования бейнитной структуры в металлопрокате в процессе термического упрочнения до настоящего времени ограничены.

**Выводы.** Закономерности формирования бейнитной структуры при различных скоростях охлаждения изучали на листовых строительных сталях 10Г2ФБ и 09Г2С, а также на арматурных сталях Ст.3 и 35ГС.

Бейнитная структура в стали 10Г2ФБ с содержанием 0,09% углерода образуется в интервале температур 600-430<sup>0</sup>С и в интервале скоростей охлаждения от 154<sup>0</sup>С/с и до 7<sup>0</sup>С/с, что совпадает с интервалом распада аустенита по смешанной кинетике. Максимальное количество бейнита, равное 60-70%, образуется в интервале скоростей охлаждения от 12<sup>0</sup>С/с и до 34<sup>0</sup>С/с.

В низкоуглеродистой стали Ст.3 с содержанием углерода 0,21% и содержанием марганца 0,50% после отдельного нагрева 920<sup>0</sup>С-10 мин распад аустенита с образованием бейнита в количестве 55-60% реализуется в интервале скоростей охлаждения от 280<sup>0</sup>С/с и до 6<sup>0</sup>С/с, что практически полностью совпадает с интервалом распада аустенита по смешанной кинетике.

С повышением содержания углерода в стали 35ГС до 0,36% при легировании 0,98%Mn после нагрева 880<sup>0</sup>С- 10 мин распад аустенита на бейнит в количестве 42-45% осуществляется в интервале скоростей распада аустенита по смешанной кинетике.

Полученные результаты позволяют утверждать, что в металлопрокате в процессе термической обработки бейнит формируется в слоях распада аустенит по смешанной кинетике. Максимальное содержание бейнита в слое не превышает 60-80%.

**Заключение.** В реальных условиях производств бейнитная структура в металлопрокате при термической обработке сталей формируется в виде узкой полосы, расположенной параллельно охлаждаемой поверхности, в интервале скоростей охлаждения, обеспечивающего распад переохлажденного аустенита по смешанной кинетике. Максимальное содержание бейнита в металлопрокате независимо от содержания углерода и легирующих элементов не превышает 60-80%.

1. *Исследование* фазовых превращений стали 10Г2ФБ при охлаждении с различными скоростями. / В.И.Большаков, А.В.Бекетов, Л.Н.Дейнеко, М.Ф.Евсюков, А.Е.Бардах // Стародубовские чтения. –Днепропетровск. – 2002. – Вып.15.
2. *Блантер М.Е.* Металловедение и термическая обработка. – М:Машгиз, 1963. – С.416.
3. *Садовский В.Д.* // Труды Института Металлофизики. – УФАН. – Вып.3. – 1945. – С. 71
4. *Блантер М.Е.* Фазовые превращения при термической обработке стали./ М: Металлургиздат, 1962. – 268с.
5. *Griffiths W.T., Pfiell L.B., Allen N.P.* // Iron and Steel Inst. 1959, – P.343.
6. *Co T., Cotrel S.A.* // Journal of iron and Steel Inst. – V.172. – 1952. – P.307.
7. *Smith G.V. and Mehl R.F.* // Trans.Amer. Inst. Min and Met Eng. – V.150. – 1942. – P.211.
8. *Гуляев А.П.* Термическая обработка стали. – М: Машгиз, 1960. – 496с.
9. *Металловедение* и термическая обработка. Справочник в 2 томах под редакцией Л.М. Бернштейна и А.Г. Рахштадта. – Металлургиздат, Москва, 1961.
10. *Качанов Н.Н.* Прокаливаемость стали. – М: Металлургия, 1964, – С.254.
11. *Паисов И. В.* Термическая обработка стали и чугуна. – М:Металлургия, 1970. – С.264.
12. *Попов А.А., Попова А.Е.* Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. – Машгиз. Москва –Свердловск, 1961. – С.430.
13. *Салтыков С.А.* Стереометрическая металлография. –. – Москва: Металургия, 1970.
14. *Высокопрочная* арматурная сталь. / А.А.Кугушин, И.Г.Узлов, В.В.Калмыков, С.А.Мадатян, А.В.Ивченко. –М.: Металлургия, 1986. – С.272.
15. Atlas zur Warmebehandlung der Stable. / Wever F., Rose A., Peter W., Strassburd W., Rademacher L. – Lusseldorf, 1954, 1956, 1958.
16. *Попова Л.Е., Попов А.А.* Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана. Справочник термиста. – М: Металлургия, 1991, 503с.
17. *Энтин Р.И.* Превращения в стали. – М: Металлургиздат, 1960. – 252 с.
18. *Новиков И.И.* Теория термической обработки металлов. – М: Металлургия, 1974. – 400 с.
19. *Bhadeshia J.W.* Bainite in Steel НКДН. // Christian Metall. Trans Actions. – V.21A. – 1990.

*Статья рекомендована к печати  
докт. техн. наук, проф. Г.В.Левченко*

*М.Ф.Євсюков, Ж.А.Демєнтьєва, Д.В.Лошкарьов*

**Про кінетику бейнітного перетворення аустеніту в сталях при термічній обробці в потоці виробництва.**

Метою дослідження є вивчення впливу швидкості охолодження в низьковуглецевих сталях на кінетику розпаду аустеніту на бейніт. Показано, що в реальних умовах виробництва бейнітна структура в металопрокаті при термічній обробці сталей формується у вигляді вузької смуги в інтервалі швидкостей охолодження, що забезпечують розпад аустеніту по змішаній кінетиці. Максимальний вміст бейніта в металопрокаті незалежно від змісту вуглецю і легуючих елементів не перевищує 60-80%.

**Ключові слова:** низьковуглецева сталь, швидкість охолодження, розпад аустеніту, бейніт

*M.F.Evsukov, J.A.Dementieva, D.V.Loshkarev*

**On the kinetics of bainite transformation of austenite in steel during heat treatment in the production flow**

The aim is to study of influencing of cooling speed in low-carbon steels on kinetics of disintegration of austenite on bainite. It is shown that in the real terms of production a bainitic structure in metalrolling at heat treatment of steels is formed as a narrow bar in the interval of cooling speeds, providing disintegration of austenitic on the mixed kinetics. Maximal maintenance of bainitic in rolled metal regardless of maintenance of carbon and alloying elements does not exceed 60-80%.

**Keywords:** reinforcement, the rate of cooling, bainite, decay kinetics, thermal and kinetic and structural diagram