

А.И.Бабаченко, О.Г.Сидоренко, А.Н.Хулин, А.П.Сухой

ЗАВИСИМОСТЬ КИНЕТИКИ БЕЙНИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ ОТ МЕЖАТОМНЫХ РАССТОЯНИЙ В ПЕРЕОХЛАЖДЕННОМ АУСТЕНИТЕ

Институт черной металлургии НАН Украины

Проанализированы кинетические особенности бейнитного превращения, развивающегося в изотермических условиях и при непрерывном охлаждении. Показано, что эти особенности хорошо согласуются с предположением о зависимости бейнитного превращения от межплоскостных расстояний в переохлажденном аустените.

Ключевые слова: аустенит, непрерывное охлаждение, бейнитное превращение

Состояние вопроса и задача исследования. С момента открытия в 1928 году бейнитного превращения [1] исследованию механизма и кинетики его развития уделялось внимание возможно даже большее, чем какому-либо другому фазовому превращению. Тем не менее, природа этого превращения полностью еще не выяснена. Так, вплоть до настоящего времени [2] наиболее устоявшимся остается предположение, в соответствии с которым переход от выделения из переохлажденного аустенита избыточного феррита или его эвтектоидного превращения к бейнитному превращению обусловлен тем, что при переохлаждении его до температур, соответствующих интервалу бейнитного превращения, диффузионные перемещения атомов железа в аустените подавлены настолько, что его фазовые превращения, развивающиеся путем неупорядоченной перестройки атомов становятся невозможными.

Принято считать, что характерное строение диаграмм изотермических превращений аустенита углеродистых сталей подтверждает известное предположение. Однако эти диаграммы свидетельствуют также и о том, что после определенного периода развития бейнитное превращение может прерваться, после чего не испытавший превращения аустенит при той же температуре изотермической выдержки распадается уже путем эвтектоидного превращения. А это однозначно указывает на то, что понижающаяся при охлаждении подвижность атомов железа и при температурах бейнитного превращения еще не может быть фактором, однозначно определяющим переход аустенита от превращений диффузионного типа к превращению мартенситного типа, к каким относят и бейнитное превращение.

В настоящем исследовании предпринята попытка определения характера термодинамических условий, которые определяют кинетические особенности развития бейнитного превращения, выявляемые при построении изотермических и термокинетических

диаграмм переохлажденного аустенита. При этом исходили из предположения о возможной зависимости температуры начала бейнитного превращения от межатомных расстояний в поступающем к превращению переохлажденном аустените. Суть этого предположения состоит в следующем.

Изложение основных результатов исследования. При построении названных выше диаграмм нагретый до высокой температуры анализируемый образец, помещают в низкотемпературную среду. После этого под влиянием разницы между температурами образца и среды начинается понижение температуры образца. Если в образце фазового превращения не наблюдается, то основным результатом этого понижения является выделение в образце физической теплоты, источником которой является кинетическая энергия колебательного движения составляющих образец атомов. Однако в реальных условиях помимо основного результата понижения температуры имеет место и вторичный его результат. Таким результатом является изменение удельного объема материала образца. При непрерывном охлаждении удельный объем образца, как правило, уменьшается. Очевидно, одновременно с этим уменьшаются и межатомные расстояния в аустените.

Было предположено, что начало бейнитного превращения в стали возможно только при достижении в аустените в процессе охлаждения определенного значения межатомных расстояний. Возможность этого должна быть связана с тем, что бейнит, как продукт фазового превращения, имеет удельный объем больший, чем аустенит, из которого он образуется. Поэтому количество теплоты, которое может выделиться при превращении аустенита в бейнит, может формироваться только за счет остатка убыли внутренней энергии, получаемого от собственно превращении одной фазы в другую, после вычитания из него того количества энергии, которое расходуется на выполнение работы расширения при образовании бейнита. Очевидно, если расход энергии на работу расширения превышает величину убыли внутренней энергии, то возможность поступления теплоты от фазового превращения исключена, а следовательно, не может происходить и само фазовое превращение с подобными энергетическими затратами, необходимыми для его развития. Но с понижением температуры и соответственным уменьшением межатомных расстояний в переохлаждаемом аустените удельная убыль внутренней энергии увеличивается. Благодаря этому даже при сохранении соотношения удельных объемов аустенита и образующегося из него бейнита, разность между убылью внутренней энергии и расходом энергии на выполнение работы расширения может сначала уменьшиться до равного нулю критического значения, а затем убыль внутренней энергии станет превышать расход энергии на выполнение работы расширения. Это обеспечит возможность выделения теплоты фазового превращения, а следовательно, и развития самого превращения.

Анализ особенностей кинетики развивающегося в изотермических условиях бейнитного превращения с позиции возможной ее зависимости от межатомных расстояний в переохлажденном аустените прежде всего позволил объяснить причину перехода от бейнитного превращения аустенита к эвтектоидному. Так, появление в переохлажденной аустенитной матрице участков бейнита, удельный объем которых больше, чем его имели участки аустенита из которых образовался бейнит, приводит к появлению в аустените растягивающих напряжений. Под влиянием этих напряжений увеличиваются межатомные расстояния в аустените. Крайним при этом является случай, при котором эти расстояния достигают критического значения. В этот момент развитие бейнитного превращения должно прекратиться при остающемся еще не превращенным аустените.

К приведенному можно добавить, что развитие бейнитного превращения в изотермических условиях может прерываться и до момента достижения межатомными расстояниями в аустените критического значения. Дело в том, что, как следует из принципа максимальной скорости производства энтропии [3], при термическом действии переход от одного фазового превращения к альтернативному определяет способность последнего к достижению более высокой скорости выделения теплоты превращения. Поэтому (рис. 1а) выявляемый при изотермических выдержках в пределах температурного интервала 550-450⁰С образцов стали с содержанием 0,32%С, 0,32%Mn и 0,31%Si эффект прерывания бейнитного превращения аустенита и переход его к эвтектоидному превращению, может свидетельствовать и о том, что при приближении межатомных расстояний в аустените к критическому значению и замедлении при этом скорости бейнитного превращения с соответствующим понижением скорости выделения теплоты превращения, переход к эвтектоидному превращению происходит потому, что в данных условиях это обеспечивает большую скорость поступления теплоты превращения.

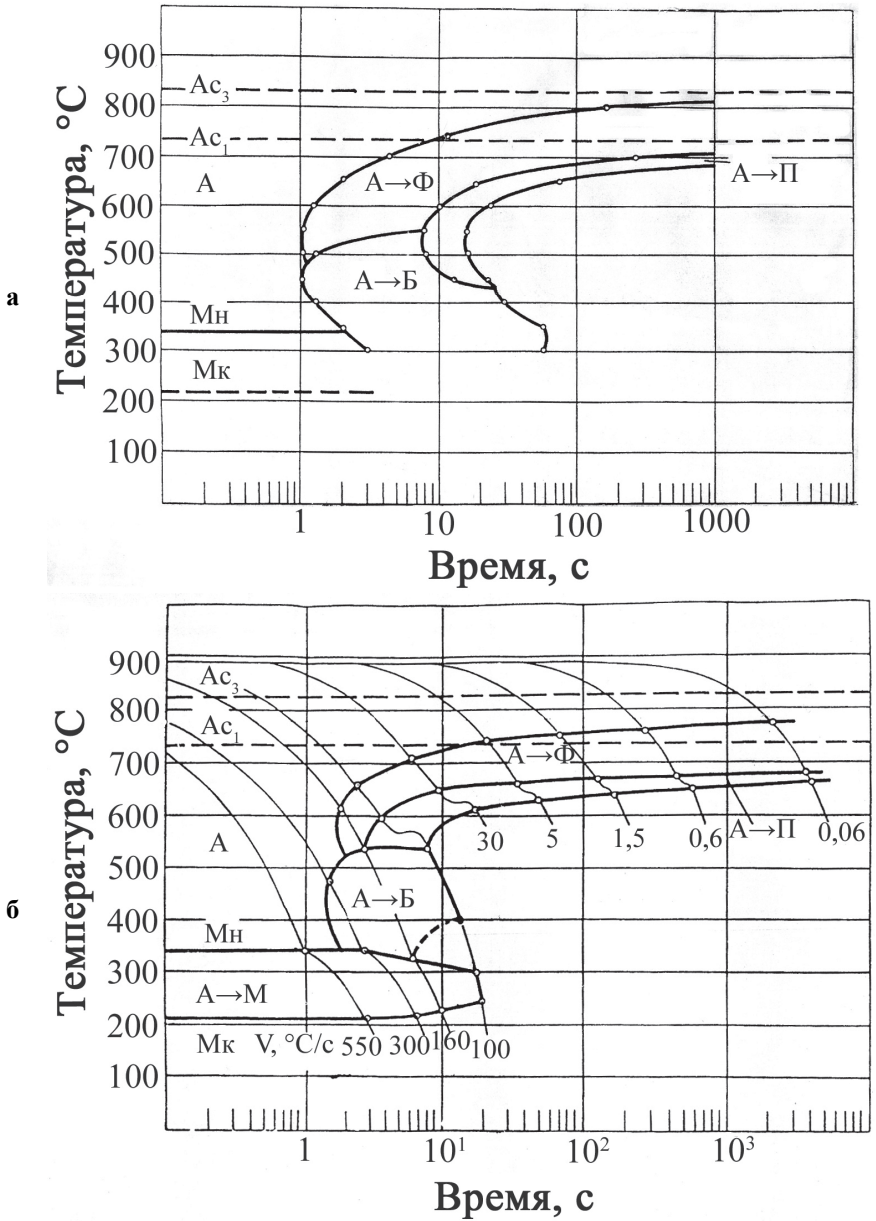


Рис.1. Изотермическая (а) и термокинетическая (б) диаграммы превращений аустенита в стали с содержанием 0,32%С, 0,32%Mn и 0,31%Si.

С понижением температуры изотермической выдержки в пределах интервала 550-450⁰С (рис.1а) прерывание бейнитного превращения происходит при все уменьшающейся доле остающегося непревращенным аустенита. Соответственно этому последовательно сужается временной интервал, в пределах которого развивается эвтектоидное превращение. И наконец достигается температура изотермической выдержки, при которой моменты достижения межатомными расстояниями в аустените критического значения, с одной стороны, и полного распада аустенита путем бейнитного превращения, с другой, - совпадают. При последующем понижении температуры изотермической выдержки переход от бейнитного превращения к эвтектоидному уже не наблюдается. Вместе с этим при приближении температуры изотермической выдержки к температуре мартенситного превращения в структуре образцов начинает обнаруживаться остаточный аустенит. Дело в том, что при таких температурах затруднена релаксация растягивающих напряжений, появившихся в аустените при бейнитном превращении. Это облегчает достижение в нем критического значения межатомных расстояний. А так как при этих температурах понизившаяся подвижность атомов железа может еще действительно быть препятствием для развития превращений аустенита диффузионного типа, то присутствующий в структуре образца остаточный аустенит приобретает абсолютную устойчивость и его количество остается постоянным независимо от длительности изотермической выдержки.

Результаты наблюдений, выполненных при изотермических выдержках образцов в интервале температур мартенситного превращения (рис.1б), свидетельствуют о том, что бейнитное превращение может иметь место и в этих условиях. При этом подобно эвтектоидному превращению при повышенных температурах бейнитного интервала, и бейнитное превращение начинается после приостановки мартенситного превращения при сохранении в структуре определенной доли остаточного аустенита. Но как и мартенситное до этого, и бейнитное превращение завершается не полным расходом этого аустенита, а лишь приостановкой превращения с сохранением существенно уменьшившейся доли остаточного аустенита. Очевидно, и на этот раз сохранение остаточного аустенита после прерывания бейнитного превращения является следствием достижения межатомными расстояниями в аустените критического значения.

Термокинетические диаграммы превращений переохлажденного аустенита свидетельствуют о том, что в условиях непрерывного охлаждения бейнитное превращение до полного расходования аустенита развиваться не может. При этом в одних случаях оно прерывается начавшимся мартенситным превращением, а в других оно приостанавливается еще до достижения температуры начала мартенситного превращения. Можно предположить, что первые случаи

характерны для сталей, у которых в силу химического состава приближение межатомных расстояний в аустените к критическому значению происходит более медленно, чем у тех, у которых приостановка бейнитного превращения происходит еще до достижения температуры мартенситного превращения.

Наблюдаются также случаи, когда в одной и той же стали при высоких скоростях охлаждения бейнитное превращение продолжается вплоть до температуры начала мартенситного, а при более низких скоростях – прерывается еще до ее достижения (рис.1б).

Экспериментальные исследования свидетельствуют, что в тех случаях, когда прерывание бейнитного превращения происходит еще до достижения образцом температуры мартенситного превращения, этот момент достаточно четко может быть выявлен с помощью дилатометрического анализа. Так, на рис.2 приведена полученная с помощью дилатометра DIV805A кривая изменений длины образца из колесной стали, содержащей 0,58%С, 0,85%Mn и 0,97%Si в сопоставлении с изменениями длины в тех же условиях эталонного образца, в котором фазовых превращений при понижении температуры не наблюдается.

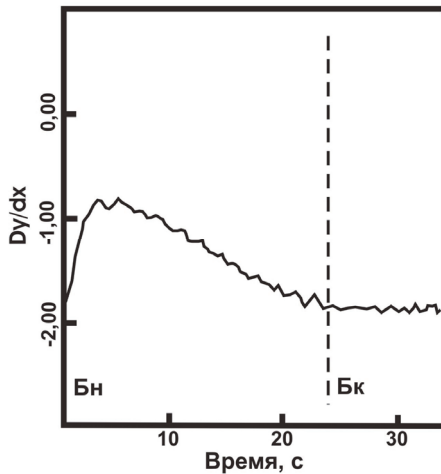


Рис.2. Относительные изменения длины анализируемого образца при протекании в нем бейнитного превращения при непрерывном охлаждении со скоростью $10^0/с$.

Представленная на рис.2 кривая свидетельствует, что по мере развития бейнитного превращения скорость начавшегося относительного приращения длины анализируемого образца сначала быстро возрастает, а затем начинает в замедляющемся темпе понижаться. Однако при достижении замедляющейся скоростью относительного приращения

длины образца определенного значения этот процесс прекращается, и далее при продолжающемся непрерывном понижении температуры скорости изменения длины эталонного и анализируемого образцов совпадают. Очевидно, выявляемое с помощью дилатометрического анализа прерывание относительного приращения длины анализируемого образца является моментом и достижения межатомными расстояниями в аустените критического значения, и прерывания бейнитного превращения.

Обнаруживаемое при построении термокинетических диаграмм понижение температуры начала мартенситного превращения при понижении скорости охлаждения является еще одним свидетельством того, что бейнитное превращение происходит при изменении межатомных расстояний в аустените. Однако однозначность утверждения об этом может быть достигнута только в том случае, если предположить, что и мартенситное превращение, у которого удельный объем продукта превращения также превышает удельный объем аустенита, является превращением, для начала развития которого необходимо преодоление уменьшающимися межатомными расстояниями определенного критического значения.

Существование критического значения межатомных расстояний в аустените при мартенситном превращении прежде всего объясняет отсутствию зависимости температуры его начала от скорости охлаждения в том случае, если до достижения этой температуры бейнитного превращения в аустените не наблюдалось. При соблюдении последнего условия межатомные расстояния в аустените при равной, достигаемой при охлаждении температуре всегда равны независимо от скорости охлаждения. Соответственно этому и преодоление межатомными расстояниями критического значения всегда должно происходить при одной и той же температуре. Но, как уже было показано, при бейнитном превращении межатомные расстояния в аустените увеличиваются. Поэтому для того, чтобы такой аустенит приобрел необходимые для начала мартенситного превращения межатомные расстояния, потребуется более глубокое его охлаждение. А так как при понижении скорости охлаждения степень бейнитного превращения увеличивается, то увеличивается и прирост межатомных расстояний в не успевшем подвергнуться превращению аустените. Поэтому для того, чтобы было достигнуто критическое значение межатомных расстояний в аустените, после которого начинается мартенситное превращение, необходимо охлаждение аустенита до более низких температур чем M_n (рис. 1 б). В результате этого температура начала мартенситного превращения аустенита, сохранившегося при бейнитном превращении, будет понижаться по мере уменьшения скорости охлаждения анализируемого образца.

Вывод. Выявленные при выполнении исследования кинетические особенности бейнитного превращения, развивающегося в изотермических условиях и при непрерывном охлаждении подтверждают правомерность предположения зависимости бейнитного превращения от межатомных расстояний в поступающем к превращению переохлажденном аустените.

1. *Davenport and E.Bain.* Transformation of Austenite at Constant Subcritical Temperature. Trans. AIME, Iron and Steel Division, 1928, v.90, h. 117-126.
2. *Власов В.С.* Металловедение. – М.: Альфа – М.: ИНФРА – М, 2009. – 336 с.
3. *Циглер Г.* Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механика сплошной среды. – М.: Мир, 1966. – 135 с

*Статья рекомендована к печати
канд.техн.наук В.С.Лучкиным.*

О.І. Бабаченко, О.Г. Сидоренко, А.М. Хулін, А.П. Сухий

Залежність кінетики бейнітного перетворення від міжатомних відстаней в переохладженому аустеніті

Проаналізовано кінетичні особливості бейнітного перетворення, що розвивається в ізотермічних умовах і при безперервному охолодженні. Показано, що ці особливості добре узгоджуються з припущенням про залежність бейнітного перетворення від міжплощинних відстаней в переохладженому аустеніті.

Ключові слова: аустенит, безперервне охолодження, бейнітне перетворення

A.I. Babachenko, O.G. Sidorenko, A.N. Hulin, A.P. Suhoy

Dependence of the kinetics of bainite transformation on the interatomic distances in the supercooled austenite

Analyzed the kinetic features of bainite transformation, evolving under isothermal conditions and under continuous cooling. It is shown that these features are in good agreement with the assumption of bainite transformation depending on the interplanar distances in the supercooled austenite.

Keywords: austenite, continuous cooling, bainite transformation