

М.Ф.Евсюков, Е.Г.Демина, П.Д.Грушко

### О КИНЕТИКЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЧУГУНАХ С УЧЕТОМ ТЕПЛА РЕКАЛЕСЦЕНЦИИ

Целью настоящего исследования является детальное изучение кинетики распада аустенита в промышленных высокопрочных чугунах методами дилатометрического и микроструктурного анализа. Исследования проведены в большом интервале скоростей охлаждения с учетом тепла фазового превращения (реколесценции). Построена термокинетическая диаграмма распада аустенита. Определены температурные интервалы и скорости охлаждения, в которых аустенит распадается как по диффузионной кинетике с выделением феррита и перлита, так и по сдвиговому механизму с образованием мартенсита.

**чугун, дилатометрический и микроструктурный методы анализа, фазовое превращение (реколесценция), скорость охлаждения**

**Состояние вопроса и задачи исследования.** В машиностроении для производства литых деталей наиболее широкое распространение получили высокопрочные чугуны по ГОСТ 7293-85 с шаровидным графитом. На практике в литых разнотолщинных деталях кроме шаровидного графита одновременно присутствует и вермикулярный графит. Чугун с шаровидным графитом обладает высокими значениями предела прочности при растяжении, сжатии и изгибе, четко выраженным пределом текучести, удовлетворительным удлинением в литом состоянии и высоким удлинением после отжига, достаточно высокой ударной вязкостью после термической обработки. Он также обладает весьма удовлетворительными литейными свойствами (хорошей жидкотекучестью, малой линейной усадкой, незначительной склонностью к образованию горячих трещин), хорошо поддается механической обработке, может подвергаться сварке и всем видам термической обработки [1,2].

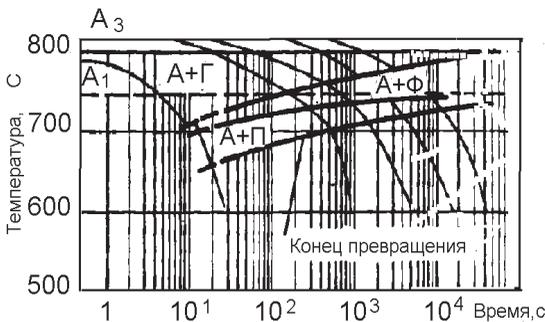


Рис.1.Термокинетическая диаграмма превращения аустенита в чугуне с шаровидным графитом.

Поэтому детальное изучение закономерностей формирования структуры в отливках приобретает первостепенное значение. В работе [3] показаны закономерности формирования структуры, в основном, при малых скоро-

стях охлаждения (рис.1). Показана кинетика распада аустенита только по диффузионному механизму с образованием феррита и перлита. Эти результаты не имеют системный характер и не позволяют судить об общих закономерностях формирования структуры с учетом температурно-временных условий охлаждения в чугунах с различным содержанием легирующих элементов и их масштабным фактором. Нет сведений о кинетике распада аустенита при больших скоростях охлаждения с образованием мартенсита. Не описаны характерные особенности распада аустенита по смешанной кинетике с учетом формы и количества графитных включений. Кроме этого все исследования фазовых превращений в высокопрочном чугуне при термической обработке выполнялись без учета тепла фазовых превращений аустенита. А этот фактор оказывает существенное влияние на кинетику распада аустенита при термической обработке. Так, при исследовании [4] высокоуглеродистых сталей с 0,54%С и 0,64%С было показано, что превращение аустенита при различных скоростях охлаждения имеет свои особенности. Превращение аустенита в перлит по диффузионной кинетике происходит с выделением значительного количества тепла. С увеличением скорости охлаждения количество тепла, выделяющееся в единицу времени, растет, что приводит вначале распада к замедлению скорости охлаждения, а затем и подъему. А это в свою очередь приводит к повышению температуры конца превращения аустенита с низким содержанием углерода и марганца до 655<sup>0</sup>С, с верхним содержанием углерода до 645<sup>0</sup>С, что выше температуры начала превращения. Наибольшее влияние тепла фазового превращения на температуру конца превращения аустенита проявляется при скоростях охлаждения 2–4<sup>0</sup>С/с. В этом случае образуется феррит в виде межзеренной прослойки, а эвтектоид присутствует в виде сорбитообразного перлита. Аналогичные данные по влиянию тепла фазовых превращений на кинетику превращения при термической обработке были получены и на эвтектоидных [5] и заэвтектоидных сталях [6] как при непрерывном охлаждении, так и в изотермических условиях при патентировании. При этом, в связи с тем, что перлит в чугуне с шаровидным графитом и перлит эвтектоидной стали идентичны по содержанию углерода, следует ожидать значительного влияния тепла фазовых превращений аустенита на кинетику распада матрицы в чугуне с шаровидным графитом. И в конечном итоге учитывать при разработке режимов термической обработки как при охлаждении после литья, так и после термической обработки после отдельного нагрева.

**Материал и методика исследования.** В качестве объекта исследования использовали промышленные отливки высокопрочного чугуна ЗАТ «Рівненський ливарний завод» следующего химического состава: 3.63%С, 2,33%Si, 0,49%Mn, 0,06%Mg.

Критические точки при нагреве и кинетику распада аустенита при охлаждении изучали на dilatометре МД-83 конструкции Института черной металлургии. Из литых деталей изготавливали dilatометрические образ-

цы диаметром 3 и 4 мм. Критические точки определяли в процессе нагрева со средней скоростью  $200^{\circ}\text{C}/\text{час}$ . При исследовании нагрев образцов в dilatометре осуществляли до  $950^{\circ}\text{C}$  с последующей выдержкой в течение 10 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 температуру образца во времени регистрировали на потенциометре КСП4, а изменение длины образца в зависимости от температуры (дилатограмму) регистрировали на двухкоординатном потенциометре ПДП4-002. По термограмме определяли среднюю скорость охлаждения и его температуру, по перегибам на дилатограммах – температуру начала и конца фазового превращения.

Результаты исследования кинетики распада аустенита высокопрочного чугуна с 3,6%С и 2,33%Si после нагрева  $950^{\circ}\text{C}$  – 10мин. обобщены и представлены в виде термокинетической диаграммы распада аустенита (рис.1). Строение продуктов распада изучали на dilatометрических образцах в поперечном сечении микроструктурным методом на микроскопе «Axiovert 200 M MAT» до и после травления 4% ниталем. Контроль микроструктуры по графиту и металлической основе проводили по ГОСТ3443-87.

**Результаты исследования.** В исходном чугуне после кристаллизации микроструктура состоит из перлита (эвтектоида) и феррита, расположенного в виде сплошного ободка вокруг графитных включений. Графитные включения присутствуют как в виде шаровидной формы, так и вермикулярного графита различного сечения, степени разветвления и размеров. Основная часть эвтектоида представляет собой сорбитообразный перлит, остальная часть эвтектоида присутствует в виде пластинчатого перлита различной дисперсности.

Критические точки высокопрочного чугуна определяли при нагреве до  $950^{\circ}\text{C}$  со скоростью  $200^{\circ}\text{C}/\text{час}$ . Исходный образец, вырезанный из литой детали, состоял из перлитной матрицы и феррита в виде оболочки вокруг шаровидного графита. Результаты исследования показали, что критические точки высокопрочного чугуна с шаровидным графитом с 3,63%С и 2,33%Si при нагреве равны:  $A_{c1} - 780^{\circ}\text{C}$  и  $A_{c3} - 860^{\circ}\text{C}$ .

На кинетику распада высокопрочного чугуна после отдельного нагрева существенное влияние оказывают процессы в аустените при охлаждении до критической точки  $A_{c3}$  и ниже. При температуре нагрева  $950^{\circ}\text{C}$  максимальная растворимость углерода в аустените составляет 1,4%. В процессе охлаждения растворимость углерода понижается и при температуре  $A_{c1}$  ( $728^{\circ}\text{C}$ ) составляет всего 0,8%. В этом случае аустенит пересыщен углеродом. При этом степень пересыщения аустенита углеродом и форма его трансформации зависит от скорости охлаждения. При очень маленьких скоростях охлаждения, выделяющийся из аустенита углерод, как правило, наслаивается на поверхность графитных включений. Одним из факторов, влияющих на скорость диффузии углерода на межфазных границах аусте-

нит–графит являются упругие и пластические напряжения, возникающие в результате различных тепловых свойств фаз таких как тепловое расширение. Если аустенит исследуемого чугуна [7] имеет температурный коэффициент теплового расширения в интервале температур 900–800<sup>0</sup>С, равный 1810<sup>6</sup>1/град, то углерод в виде графита имеет температурный коэффициент, равный 5–710<sup>6</sup>1/град. В результате под действием упругих напряжений в приграничных слоях аустенита образуется большое количество дефектов структуры таких как дислокации различной формы и протяженности и вакансии. А это в свою очередь способствует повышению скорости диффузии углерода из аустенита к графитным включениям. С повышением скорости охлаждения часть углерода трансформируется в отдельные мелкие частицы графита. При высоких скоростях охлаждения пересыщенный углеродом аустенит сохраняется до температур начала мартенситного превращения. Это способствует понижению температуры начала мартенситного превращения и повышению количества остаточного аустенита .

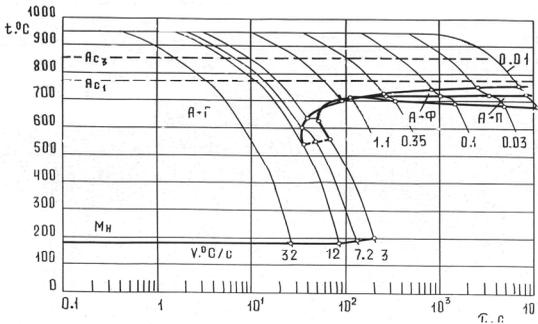


Рис.2. Термокинетическая диаграмма превращения аустенита высокопрочного чугуна после нагрева 950<sup>0</sup>С и выдержки 10 мин.

При охлаждении чугуна со скоростью выше критической, равной 32<sup>0</sup>С/с, пересыщенный углеродом аустенит начинает распадаться только при температуре 180<sup>0</sup>С. При дальнейшем охлаждении скорость распада аустенита на мартенсит за счет выделения тепла фазового превращения понижается. Так как температура конца фазового превращения лежит при отрицательных температурах, то при комнатной температуре сохраняется 20–25% остаточного аустенита. С понижением скорости охлаждения до 12<sup>0</sup>С/с температура начала распада переохлажденного аустенита не изменилась и равна 180<sup>0</sup>С/с. В этом случае микроструктура образцов охлажденного чугуна состоит из графита, игольчатого мартенсита и остаточного аустенита в количестве 20–25 (рис.2). Остаточный аустенит располагается в виде прослоек между мартенситными иглами.

В интервале скоростей охлаждения от 12<sup>0</sup>С/с до 3<sup>0</sup>С/с аустенит распадается по смешанной кинетике. При охлаждении со скоростью 7,2<sup>0</sup>С/с распад переохлажденного аустенита на перлит начинается при температуре 600<sup>0</sup>С .При дальнейшем охлаждении до температур 550<sup>0</sup>С часть аустенита распадается по диффузионной кинетике с образованием эвтектоида в

виде перлита высокой дисперсности в количестве 20–25%. В этом случае первые перлитные колонии зарождаются как на границах аустенитных зерен, так и на границах с графитными включениями (рис.3,а). При этом, степень распада аустенита на перлит с уменьшением скорости охлаждения от  $7,3^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до  $3^{\circ}\text{C}/\text{с}$  увеличивается до 95%. Однако, температура торможения распада аустенита повышается незначительно и всего на  $30^{\circ}\text{C}$ . При дальнейшем охлаждении от  $540^{\circ}\text{C}$  и до  $250^{\circ}\text{C}$  в интервале скоростей охлаждения от 3 до  $7,2^{\circ}\text{C}/\text{с}$  переохлажденный аустенит устойчив и реакция распада переохлажденного аустенита на бейнит не наблюдается.

В процессе дальнейшего охлаждения остаточный аустенит распадается по сдвиговому механизму с образованием игольчатого мартенсита. При этом, с увеличением степени распада аустенита по диффузионной кинетике на перлит температура начала распада остаточного аустенита повышается до  $190^{\circ}\text{C}$ . Аналогичная зависимость изменения температура начала распада остаточного аустенита была установлена и в ряде работ на эвтектоидных и заэвтектоидных сталях [8,9]. Мартенситные участки, как правило, располагаются в междуветвиях литой структуры в виде компактных единичных включений (рис.3,б).

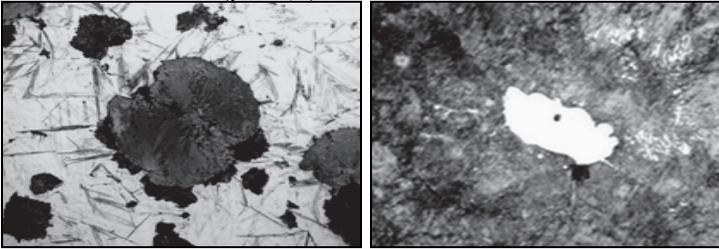


Рис.3 Микроструктура чугуна после нагрева 950–10мин и охлаждения со скоростью: а –  $7,2^{\circ}\text{C}/\text{с}$  и б –  $3^{\circ}\text{C}/\text{с}$ .

При всех остальных скоростях охлаждения ниже  $3^{\circ}\text{C}/\text{с}$  аустенит в процессе охлаждения распадается по диффузионной кинетике с образованием структурно свободного феррита и перлита. Однако, кинетика распада аустенита зависит как от скорости охлаждения, так и от тепла фазового превращения аустенита. Наибольший эффект влияния тепла фазового превращения наблюдается в интервале скоростей охлаждения  $2\text{--}3^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . Так, если при скорости охлаждения  $2,4^{\circ}\text{C}/\text{с}$  температура начала и конца фазового превращения равна  $670\text{--}695^{\circ}\text{C}$ , то при повышении скорости охлаждения до  $3^{\circ}\text{C}/\text{с}$  устойчивость резко повышается. В этом случае температура начала распада аустенита на перлит понижается до  $640^{\circ}\text{C}$ . При этом, температура фазового превращения аустенита чугуна на 80–85% за счет тепла превращения понижается только до  $630^{\circ}\text{C}$ . В процессе дальнейшего охлаждения скорость распада остаточного аустенита резко понижается. Дальнейший распад до 95–97% реализуется только после охла-

ждения до  $560^{\circ}\text{C}$ . Остаточный аустенит распадается ниже температуры  $200^{\circ}\text{C}$  на мартенсит.

Микроструктура, в основном, состоит из сорбитообразного перлита. Кроме этого в отдельных местах вблизи графитных включений наблюдается и пластинчатый перлит различной дисперсности. При скорости охлаждения  $2,4^{\circ}\text{C}/\text{с}$  температура начала распада повышается до  $670^{\circ}\text{C}$ . При дальнейшем охлаждении за счет тепла фазового превращения происходит отогрев образца до  $695^{\circ}\text{C}$ . При дальнейшем уменьшении скорости охлаждения до  $1,1^{\circ}\text{C}/\text{с}$  влияние тепла на температурный интервал распада аустенита уменьшается. В этом случае распад аустенита начинается при температуре  $700^{\circ}\text{C}$ . В процессе охлаждения до  $690^{\circ}\text{C}$  распадается около 25–30%. Остальной аустенит распадается с выделением тепла и отогревом образца до  $710^{\circ}\text{C}$ . Микроструктура состоит, в основном, из сорбитообразного перлита. По строению перлит неоднороден только вблизи графитных включений.

При скоростях охлаждения ниже  $1,1^{\circ}\text{C}/\text{с}$  распад аустенита сопровождается образованием структурно свободного феррита вокруг включений графита. Это обусловлено тем, что аустенит, примыкающий к графиту, обогащен феррито образующим элементом – кремнием. Это и способствует распаду аустенита в первую очередь с выделением структурно-свободного феррита. Установлено, что чем крупнее глобулы графита, тем пропорционально больше по ширине шаровидные оболочки феррита. В участках чугуна с вермикулярным графитом оторочки феррита повторяют форму графитных включений [10,11]. Кроме этого, феррит выделяется и в ветвях дендритов. Это обусловлено обратной дендритной ликвацией кремния. В этом случае аустенит ветвей с повышенным содержанием кремния также распадается с образованием феррита

Первые участки структурно свободного феррита появляются в аустените в процессе охлаждения со скоростью  $0,7^{\circ}\text{C}/\text{с}$  при температуре  $720^{\circ}\text{C}$  в виде разорванной тонкой оболочки на границе с графитными включениями

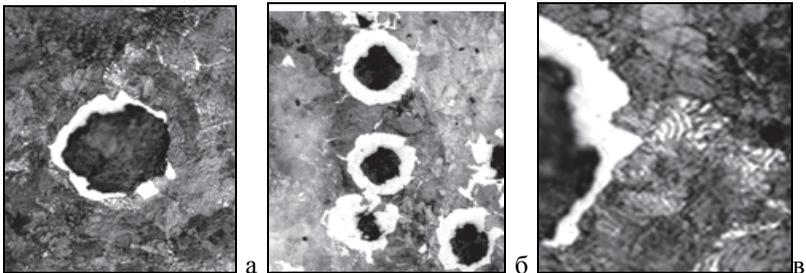


Рис.4. Микроструктура чугуна после нагрева  $950^{\circ}$ –10мин и охлаждения со скоростью  $0,35^{\circ}\text{C}/\text{с}$  (а) и  $0,1^{\circ}\text{C}/\text{с}$  (б,в),  $\times 100$

С уменьшением скорости охлаждения до  $0,35^{\circ}\text{C}/\text{с}$  температурный интервал распада аустенита увеличивается, в основном, за счет повышения температуры начала образования феррита. Первые зерна феррита зарождаются на границе с графитными включениями при температуре  $725^{\circ}\text{C}$ . Степень распада аустенита на феррит в процессе охлаждения до  $715^{\circ}\text{C}$  составляет 5–10%. Феррит выделяется на границе с графитом в виде тонкой оболочки (рис.4,а). Это обусловлено тем, что при данной скорости охлаждения аустенит вокруг графитных включений меньше обедняется углеродом, что и приводит к образованию феррита только в виде разорванной каймы вокруг графитных включений. При температурах охлаждения ниже  $715^{\circ}\text{C}$  весь аустенит распадается с образованием эвтектоида в виде феррито–цементитной смеси. При этом, уменьшение скорости охлаждения печи приводит к уменьшению количества тепла, выделяющегося в образце, что и способствует некоторому понижению температуры конца распада аустенита до  $700^{\circ}\text{C}$ .

При уменьшении скорости охлаждения высокопрочного чугуна до  $0,1^{\circ}\text{C}/\text{с}$  температура начала распада аустенита на феррит повышается до  $740^{\circ}\text{C}$ . В процессе дальнейшего охлаждения степень распада аустенита на феррит в виде каемки вокруг графитных включений повышается и при температуре  $715^{\circ}\text{C}$  составляет 20–25%. При дальнейшем охлаждении печи за счет уменьшения фронта распада и уменьшения скорости выделения тепла температура образца понижается и при температуре  $695^{\circ}\text{C}$  распад аустенита заканчивается. Микроструктура чугуна после охлаждения с данной скоростью состоит из графитных включений, феррита, в основном, в виде сплошной каймы (рис.4,б) в количестве 20–25% и перлита в количестве 75–80%. При этом, перлит неоднородный и присутствует как в сорбитообразной, так и пластинчатой формы.(рис.4,в)

Полнота диффузионных процессов углерода оказывает существенное влияние на кинетику распада аустенита при температурах ниже  $A_{c1}$  при очень малых скоростях охлаждения. Так, при охлаждении со скоростью  $0,03^{\circ}\text{C}/\text{с}$  распад аустенита начинается при температуре  $750^{\circ}\text{C}$  с образованием феррита. Первые зерна феррита зарождаются, как правило, на границе с графитными включениями. В процессе дальнейшего охлаждения растущие ферритные зерна образуют широкую сплошную кайму вокруг графитных включений. При этом, на ферритных границах, примыкающих к графиту, появляются графитные выделения, растущие от глобулярного графита (рис.5,а). Максимальное содержание феррита составляет около 25–30%. При температуре  $720^{\circ}\text{C}$  начинает превращаться с образованием эвтектоида. Ниже температуры  $720^{\circ}\text{C}$  за счет уменьшения скорости распада аустенита, а следовательно и уменьшения скорости выделения тепла фазового превращения, температура образца понижается и в конце распада аустенита она составляет  $700^{\circ}\text{C}$ .

Микроструктурная картина распада аустенита следующая. Феррит выделяется как вокруг включений графита (рис.5,а) так и по границам

аустенитных зерен в осевых участках дендритов (рис.5,б). При этом, общее количество феррита по сравнению с предыдущими скоростями охлаждения увеличилось до 25–30%. Эвтектоид состоит в основном из сорбитообразного перлита. Кроме этого значительная часть эвтектоида состоит из перлита с пластинчатой формой цементита.(рис.5,в). Перлит, как правило, не контактирует с графитными включениями и расположен преимущественно в междуветвях дендритов. При этом, с понижением скорости охлаждения до  $0,01^{\circ}\text{C}/\text{с}$  температура начала выделения феррита незначительно повышается до  $755^{\circ}\text{C}$ . При дальнейшем уменьшении скорости охлаждения до  $0,003^{\circ}\text{C}/\text{с}$  за счет более полного протекания диффузионных процессов углерода степень распада аустенита на феррит увеличивается до 40–50%. При скоростях охлаждения ниже  $0,001^{\circ}\text{C}/\text{с}$  весь аустенит распадается на феррит с выделением избыточного углерода в виде графита.[10].

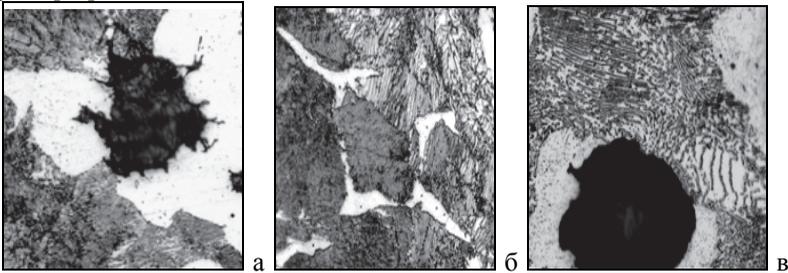


Рис.5. Микроструктура чугуна после нагрева  $950^{\circ}\text{C}$ –10мин и охлаждения со скоростью  $0,03^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , ниталь,  $\times 100$ .

После нагрева чугуна и последующим медленным охлаждением со скоростями ниже  $0,001^{\circ}\text{C}/\text{с}$  в районе температур эвтектоидного превращения аустенит распадается с образованием феррита, а углерод из аустенита выделяется на включениях графита. Ниже температуры  $735^{\circ}\text{C}$  аустенит начинает распадаться на эвтектоидную смесь феррита и графита. Однако, при этом не образуется характерной для эвтектоида двухфазной структуры с определенным ориентационным соотношением [10]. В этом случае графит, образующийся при распаде аустенита, наслаивается на поверхности ранее образовавшихся включений графита, а эвтектоидный феррит образуется самостоятельно в виде структурно свободного феррита, кинетика образования которого отлична от кинетики образования в доэвтектоидных сталях.

**Выводы.** Проведенное исследование высокопрочного чугуна с 3,6%с и 2,33%Si дилатометрическим и структурным методами после отдельного нагрева  $950^{\circ}\text{C}$ –10мин позволили сделать следующие выводы:

1. Высокопрочный чугун в исходном литом состоянии состоит как из шаровидного, так и вермикулярного графита. При этом, в тонкостенных участках деталей, охлажденных с повышенной скоростью, размер и коли-

чество шаровидного графита уменьшается, а доля вермикулярного графита увеличивается. Основная часть эвтектоида представляет собой сорбитообразный перлит, остальная часть эвтектоида присутствует в виде пластинчатого перлита различной дисперсности.

2. Критические точки высокопрочного чугуна при нагреве со скоростью  $200^{\circ}\text{C}/\text{час}$ , как среднее значение трех измерений равны:  $A_{c1} - 780^{\circ}\text{C}$  и  $A_{c3} - 860^{\circ}\text{C}$ .

3. В процессе нагрева и выдержки чугуна при температуре  $950^{\circ}\text{C}$  происходит трансформация графитных включений. Вермикулярный графит и мелкие графитные включения растворяются. Углерод перемещается и оседает на более крупных графитных включениях. В конечном итоге идет рост графитных включений, в основном, шаровидной формы.

4. В процессе охлаждения аустенит становится пересыщенным углеродом. При этом степень пересыщения аустенита углеродом и форма его трансформации зависит от скорости охлаждения. При скоростях охлаждения ниже  $1,1^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , выделяющийся из аустенита углерод, как правило, наслаивается на поверхность графитных включений. В результате этого содержание углерода понижается до эвтектоидного состава, равного  $0,8\%$ . Однако, при скоростях охлаждения выше  $12^{\circ}\text{C}/\text{с}$  аустенит сохраняется пересыщенным до температуры  $M_n$ .

5. Системный анализ кинетики распада аустенита в большом интервале скоростей охлаждения показал, что при скоростях охлаждения ниже  $0,7^{\circ}\text{C}/\text{с}$  аустенит начинает распадаться с образованием структурно свободного феррита вокруг графитных включений. При этом, температура начала распада на феррит, так же как и степень его образования зависит от скорости охлаждения. При скорости охлаждения  $0,35^{\circ}\text{C}/\text{с}$  распад аустенита на феррит начинается при температуре  $725^{\circ}\text{C}$ . При дальнейшем охлаждении выделяется всего  $5-10\%$ . При скорости охлаждения  $0,01^{\circ}\text{C}/\text{с}$  температура начала выделения феррита повышается до  $755^{\circ}\text{C}$ , а степень распада его увеличивается до  $30-35\%$ . При этом, если при скорости охлаждения  $0,35^{\circ}\text{C}/\text{с}$  феррит выделяется в виде узкой каемки вокруг графитных включений независимо от их формы и размеров, то при скорости охлаждения  $0,01^{\circ}\text{C}/\text{с}$  и меньше феррит выделяется как в виде широкой каемки вокруг графитных включений, так и в виде широких полос по границам аустенитных зерен.

6. При температурах ниже  $725^{\circ}\text{C}$  аустенит распадается по диффузионному механизму с образованием эвтектоида в виде перлита различной дисперсности. При этом, кинетика распада и образующиеся структуры существенным образом зависят от скорости охлаждения. При скорости охлаждения  $0,35^{\circ}\text{C}/\text{с}$  аустенит распадается на перлит в интервале температур  $715-700^{\circ}\text{C}$ . При уменьшении скорости охлаждения до  $0,01^{\circ}\text{C}/\text{с}$  температурный интервал распада аустенита расширяется и равен  $730-700^{\circ}\text{C}$ , а степень распада аустенита с образованием пластинчатого перлита увеличивается до  $30-40\%$ . Однако, с увеличением скорости охлаждения до

1,1<sup>0</sup>С/с за счет тепла фазового превращения температурный интервал распада аустенита уменьшается и равен 710–700<sup>0</sup>С. Наибольший эффект влияния скорости охлаждения на устойчивость аустенита наблюдается в интервале скоростей охлаждения равном от 3 до 7,2<sup>0</sup>С/с. При скорости охлаждения 3<sup>0</sup>С/с температурный интервал распада аустенита понижается до 560<sup>0</sup>С. С дальнейшим повышением скорости охлаждения до 7,2<sup>0</sup>С/с температура начала распада понижается до 600<sup>0</sup>С. При температуре 540<sup>0</sup>С распад аустенита тормозится.

7. При дальнейшем охлаждении от 540<sup>0</sup>С и до 250<sup>0</sup>С в интервале скоростей охлаждения от 3 до 7,2<sup>0</sup>С/с переохлажденный аустенит устойчив и реакция распада переохлажденного аустенита на бейнит не наблюдается.

8. Кинетика распада переохлажденного аустенита по сдвиговому механизму с образованием игольчатых структур – мартенсита также зависит от скорости охлаждения. При охлаждении чугуна со скоростью выше критической, пересыщенный углеродом аустенит начинает распадаться только при температуре 180<sup>0</sup>С. В этом случае микроструктура образцов охлажденного чугуна при скоростях выше 12<sup>0</sup>С/с состоит из графита, игольчатого мартенсита и остаточного аустенита в количестве 20–25%. С понижением скорости охлаждения до 3<sup>0</sup>С/с за счет предварительного распада аустенита на перлит температура начала мартенситного превращения повышается до 200<sup>0</sup>С, а степень распада понижается до нуля. В этом случае микроструктура чугуна в интервале скоростей охлаждения по смешанной кинетике состоит из графита, перлита, мартенсита и остаточного аустенита. При этом, количество мартенсита и остаточного аустенита уменьшается до нуля, а количество перлита увеличивается до 100%.

9. Фазовое превращение аустенита в процессе охлаждения сопровождается выделением тепла. При этом, количество выделяющегося тепла при распаде единицы объема аустенита зависит от типа образующихся структур. Минимальное количество тепла выделяется при распаде с образованием феррита. Скорость охлаждения образцов в интервале температур фазового превращения уменьшается на 20–30%. Максимальный эффект влияния тепла фазового превращения наблюдается при распаде аустенита на перлит, в интервале скоростей охлаждения от 2,4<sup>0</sup>С/с до 1,1<sup>0</sup>С/с. В этом случае температура конца фазового превращения за счет отогрева образца на 10–20<sup>0</sup>С выше температуры начала фазового превращения аустенита на перлит. При распаде аустенита по сдвиговому механизму на мартенсит тепло рекалесценции оказывает существенное влияние на кинетику распада. Наибольший эффект наблюдается в процессе охлаждения при распаде аустенита до 50%. В этом случае скорость распада аустенита за счет уменьшения скорости охлаждения уменьшается в 2–3 раза. При охлаждении до 120–150<sup>0</sup>С за счет уменьшения выделения тепла скорость охлаждения образца увеличивается до среднего значения.

1. *Материалы* в машиностроении. Справочник. Т.4. Чугун. // Под редакцией А.А.Жукова, А.Д.Шермана. – М: Машиностроение, 1969. – 248с.
2. *Чугун*. Справочник. / Под ред. А.Д.Шермана, А.А.Жукова. – М: Metallurgia, 1991. – 575с.
3. *Фролов Д. Ш., Мирза А. Н.* Микроструктурное изучение распада переохлажденного аустенита в магниевом чугуне с шаровидным графитом. // *Металловедение и обработка металлов*. – 1957. – №9.
4. *Термокинетические* диаграммы превращения аустенита колесной стали. / М.Ф.Евсюков, В.И.Узлов, Е.А.Шаповал, Е.С.Романенко. //– В кн.: Производство термически обработанного проката. МЧМ СССР. – М: Metallurgia, 1986. – С.76–79.
5. *Режим* двухстадийного охлаждения катанки из стали 80КРД на линии Стилмор. / Э.В. Парусов, В.В Парусов., М.Ф.Евсюков, А.И.Сивак, А.Б.Сычков. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2006. – № 3. – С.64–66.
6. *Фазовые* и структурные превращения аустенита в стали 90К при непрерывном охлаждении. / В.А.Луценко, М.Ф.Евсюков, А.И.Сивак, В.А.Маточкин и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Ст.научн.тр.ИЧМ НАН Украины. – 2006. – Вып.13. – С.155–161.
7. *Структурные* превращения при отпуске в высокопрочных и серых чугунах. / М.Ф.Евсюков, Е.Г.Демина, А.Н.Хулин, Д.В.Лошкарёв // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Сб. научн. трудов. ИЧМ НАН Украины. – 2011. – Вып. 23. – С.267–276.
8. *Попов А.А., Попова А.Е.* Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. – Машгиз. Москва –Свердловск, 1961. – С.296–307.
9. *Евсюков М.Ф., Лошкарёв Д. В.* Фазовые превращения аустенита в заэвтектидных сталях после кристаллизации. / *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. // Сб. научн. трудов. ИЧМ НАН Украины.– 2010. – Вып.22. – С.190–198.
10. *Бунин К.П., Малиночка Я.Н., Таран Ю.Н.* Основы металлографии чугуна. – М: Metallurgia, 1969.
11. *Богачев И. Н.* Металлография чугуна. – М: Metallurgizdat, 1962. – 392с.

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

***М.Ф.Евсюков, Е.Г.Дьоміна, П.Д.Грушко.***

**Про кінетику фазових перетворень у високоміцних чавунах з урахуванням тепла реколесценції**

Метою даного дослідження є детальне вивчення кінетики розпаду аустеніту в промислових високоміцних чавунах методами дилатометричного та мікроструктурного аналізу. Дослідження проведено у великому інтервалі швидкостей охолодження з урахуванням тепла фазового перетворення (реколесценції). Побудовано термокінетичну діаграму розпаду аустеніту. Визначено температурні інтервали і швидкості охолодження, в яких аустеніт розпадається як за дифузійною кінетикою утворення фериту та перліту, так і за зсувним механізмом утворення мартенситу.