

О.Н. Перков, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-8101-4054

И.А. Вакуленко, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-7353-1916

В.М. Кузьмичев, зав. отделом, ORCID 0000-0003-2057-3001

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины

ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА (ТЦО) МЕТАЛЛОВ – ПУТЬ К ПОЛУЧЕНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ

Аннотация. Целью настоящей работы является изучение возможности использования термической циклической обработки (ТЦО) металлов для получения структур, определяющих оптимальный комплекс механических свойств. Приведены основные положения ТЦО металлов с использованием периодически повторяющихся циклов нагрева и охлаждения. Метод ТЦО, как способ термообработки, основан на постоянном накоплении от цикла к циклу положительных изменений в структуре металлов. Исследования показали, что при быстром нагреве рост аустенитного зерна происходит медленно и поэтому нагрев до высоких температур (до 1000⁰С) не ведет к интенсивному увеличению зерна. Установлено, что увеличение размеров зерен идет при переменной температуре нагрева в 3 раза медленнее, чем в изотермических условиях при соответствующей температуре. При условии, когда скорость роста новой фазы (аустенита) мала, а скорость зарождения зерен значительна, получается, что к концу $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения сохраняется сверхмелкозернистая структура. Дальнейший нагрев или выдержка при постоянной температуре приводит к быстрому укрупнению зерен аустенита. Если произвести охлаждение (например, на воздухе) быстро нагретой стали на 10–15⁰С выше температуры точки A_{c1} , то вследствие обратной перекристаллизации образуется мелкое зерно перлита. При одном термоцикле феррит в доэвтектидных сталях почти не претерпевает изменений. Но если произвести несколько таких нагревов и охлаждений, то вся ферритно-перлитная структура претерпевает изменение. Установлено, что чем больше скорость нагрева при ТЦО и меньше перегревы над точкой A_{c1} , тем мельче зерно в углеродистой конструкционной стали. Однако при этом возрастает необходимость увеличивать число циклов термообработки. Приведен механизм структурообразования, объясняющий эти явления, и практические рекомендации по реализации процесса ТЦО. Такой подход дает возможность сформировать оптимальную структуру металла. При этом могут быть существенно расширены возможности в части получения материалов с заданными свойствами и совершенствование на этой основе машин, конструкций, отдельных узлов и деталей. Все это ставит ТЦО в разряд перспективных направлений в металлообработке.

Ключевые слова: термическая циклическая обработка, сталь, структурные превращения, аустенит, перлит, феррит

Ссылка для цитирования: Перков О.Н., Вакуленко И.А., Кузьмичев В.М. Термоциклическая обработка (ТЦО) металлов – путь к получению оптимальных структуры и свойств. //«Фундаментальні та прикладні проблеми

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii».* – 2019. – Vypusk 33

Физико-химические основы ТЦО

Состояние вопроса. Метод термической обработки металлов (ТЦО) как способ термообработки (ТО) основан на постоянном накоплении от цикла к циклу обработки положительных изменений в структуре металлов. При этом важной особенностью цикла является его интенсивность, отсутствие или наличие небольших выдержек при крайних температурах, а также оптимальный диапазон изменения температуры.

Современное оборудование позволяет вести процесс со скоростью нагрева от десятых долей градуса в секунду (печной нагрев) до сотен (нагрев с помощью ТВЧ). Температурный диапазон зависит от назначения термического воздействия, физико-механических и теплофизических свойств материала, а также от его структурного состояния. С другой стороны, варьируя число циклов, которое является величиной в значительной степени ограниченной, так как речь идет о технологическом термоциклировании, возможно получение принципиально различных структур, а следовательно и свойств. Немаловажное значение имеет и обработка, следующая за ТЦО, такая, как отжиг, искусственное старение и др. Поэтому очень важно при выборе окончательной операции не только сохранить те положительные изменения, которые произошли в результате ТЦО, но также и усилить их.

В отличие от стандартных методов ТО, при ТЦО появляются дополнительные источники воздействия на структуру, свойственные только процессу прерывного изменения температуры, основными из которых являются фазовые превращения, градиенты температуры, термические (объемные) и межфазные напряжения, обусловленные разницей теплофизических характеристик, составляющих структуру фаз.

В зависимости от вида перемещения атомов через межфазную границу и степени развития диффузионных процессов превращения бывают массивными, мартенситными, когерентными и нормальными.

Массивные превращения характеризуются нормальными (индивидуальными) переходами атомов без перераспределения компонентов между фазами. Образуется фаза того же состава, что и исходная.

При *мартенситных* превращениях атомы перемещаются кооперативно (по сдвиговому механизму) на расстояния, не превышающие межатомные. Превращение происходит при сильном переохлаждении. При этом индивидуальные переходы атомов через межфазную границу затруднены. Образующаяся в этих условиях фаза имеет состав, аналогичный исходной, однако она находится в

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

кристаллогеометрической связи с ней.

Перестройка решетки происходит путем перемещения частичных дислокаций. В связи с изменением формы превращающейся области, происходит релаксация упругих напряжений, следствием чего является образование дефектов кристаллического строения в мартенситной и исходной фазах.

Когерентные (видманштеттовые) превращения осуществляются по сдвигово-диффузионному механизму с образованием фазы, отличающейся по составу, и изменением формы превращенного объема.

Нормальные (некогерентные) превращения протекают при значительно меньших переохлаждениях путем индивидуальных переходов атомов с образованием фазы, отличной по составу от исходной.

На окончательную структуру влияют фазовые переходы, не связанные с существенными изменениями фазового состава. Речь идет о сфероидизации фаз и коалесценции. При этом движущими силами могут быть разница в удельной энергии межфазных границ, а кроме того, разница в свободной энергии более мелких и более крупных частиц (энергия Гиббса). Таким образом, все фазовые переходы сопряжены со стремлением системы к энергетически более выгодному состоянию. При этом процесс диффузии атомов в зависимости от природы материала и физико-химических свойств может идти по одному из рассмотренных выше механизмов.

Цель настоящей работы: получение структур, обеспечивающих оптимальный комплекс механических свойств стали.

Термоциклическая обработка основана на многократном прохождении структурных превращений. Так, если при обычных видах ТО, включающих изотермические выдержки, структура характеризуется начальным и конечным состояниями, то при ТЦО структура перед каждым новым циклом разная, что влияет на условия прохождения последующих фазовых превращений, их механизм и кинетику. При этом за счет накопления структурных изменений материал может приобретать структуру, которая недостижима при обычных видах ТО.

Рассмотрим более подробно процессы, происходящие при ТЦО. Фазовые и структурные превращения сопровождаются образованием, перемещением и аннигиляцией точечных и линейных дефектов, а также перераспределением легирующих элементов. Интенсивность процессов зависит от многих технологических факторов, в том числе от температурного интервала, скоростей нагрева и охлаждения, числа превращений и т.д. В результате многократной аустенитизации, из-за разницы удельных объемов превращенных фаз, в металле протекают процессы, свойственные нагреву слабдеформированных металлов, а именно: диффузия точечных дефектов и их сток в дислокации и границы с попутной частичной их аннигиляцией; перераспределение дислокаций;

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy»». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii»». – 2019. – Vypusk 33*

формирование малоугловых границ; миграция малоугловых границ с поглощением дефектов; миграция межзёренных границ между рекристаллизованными зёрнами и укрупнение последних при одновременном снижении зернограницной и поверхностной энергий [1].

При ТЦО не все процессы, свойственные нагреву слабо деформированных металлов, протекают одновременно, а именно в силу непрерывности изменения температуры могут идти одни, тормозиться другие и развиваться третьи. Если структурные составляющие материала деформированы не сильно, как это имеет место при ТЦО, то в полцикле нагрева возможно протекание первичной рекристаллизации, а при меньших температурах – и полигонизации. Центры рекристаллизации образуются в первую очередь в тех участках решетки, которые наиболее искажены, в том числе у границ зёрен и их стыков. Это ведет к формированию мелкозернистой структуры. Процесс рекристаллизации при ТЦО можно представить как чередование малых деформаций при кристаллизационных отжигах.

Известно [2], что при заданной температуре старения скорость зарождения выделений определяется работой образования критического зародыша $\Delta F_{кр}$. Первыми появляются зародыши с минимальной $\Delta F_{кр}$, а затем – зародыши с большей ее величиной. При температуре T_1 (рис. 1.) последовательность образования выделений такова: сначала образуются зоны Гинье–Престона (ЗГП), затем по истечении времени $\tau_{\beta'}$ – промежуточная β' -фаза, а после выдержки τ_{β} – стабильная β -фаза.

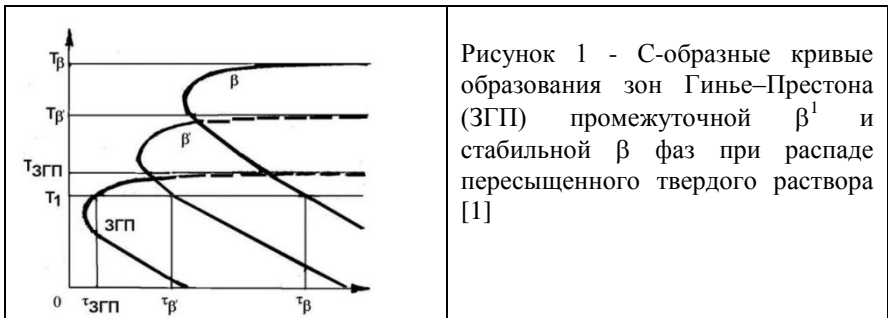


Рисунок 1 - С-образные кривые образования зон Гинье–Престона (ЗГП) промежуточной β' и стабильной β фаз при распаде пересыщенного твердого раствора [1]

Известно [2], что при заданной температуре старения скорость зарождения выделений определяется работой образования критического зародыша $\Delta F_{кр}$. Первыми появляются зародыши с минимальной $\Delta F_{кр}$, а затем – зародыши с большей ее величиной. При температуре T_1 (рис. 1.) последовательность образования выделений такова: сначала образуются зоны Гинье–Престона (ЗГП), затем по истечении времени $\tau_{\beta'}$ – промежуточная β' -фаза, а после выдержки τ_{β} – стабильная β -фаза.

Для большинства сплавов максимальное упрочнение создается, когда в структуре отсутствуют некогерентные выделения. Существуют несколько возможных варианта образования более стабильных выделений, а именно: прямое превращение менее устойчивых в более стабильные, а также независимое зарождение и рост стабильных фаз. При этом образование более стабильных фаз сопровождается одновременным растворением менее устойчивых.

Так как упрочнение достигается за счет торможения дислокаций продуктами распада, в том числе полями упругих напряжений в матрице вокруг выделений при перерезании или огибании выделений дислокациями, то с точки зрения получения наибольшего упрочнения предпочтительно образование ЗПП и промежуточных фаз. Выделения стабильных фаз некогерентны матрице, не имеют полей упругих напряжений, а расстояния между ними сравнительно велики. Это делает возможным значительно более легкое огибание таких препятствий дислокациями.

В основе ТЦО, так же, как и при «динамическом» старении, лежат процессы, связанные с возникновением и релаксацией напряжений, накоплением дефектов кристаллического строения, развитием субструктуры, что эффективно влияет на распад твердого раствора. При этом в отличие от искусственного старения, где распад твердого раствора определяется только температурно-временными параметрами, при ТЦО возможно перераспределение продуктов распада регулированием скоростями нагрева и охлаждения в циклах, интервалом ТЦО, а также числом циклов. Решающее влияние на процесс распада, очевидно, будет оказывать объемная упругая энергия взаимодействия между создаваемым в процессе ТЦО полем напряжений и полем напряжений, образующимся вследствие выделения упрочняющих фаз, как результат несоответствия кристаллических решеток и модулей упругости матрицы и фазы. При этом возможно достижение состояния структуры, при котором в ней будут присутствовать только предвыделения и метастабильные фазы.

Характерные для ТЦО структурные изменения могут быть усилены путем пластической деформации. Как известно, пластическая деформация перераспределяет и повышает плотность несовершенств кристаллического строения – дислокаций, вакансий, дефектов упаковки, а кроме того, способствует образованию и развитию мало- и высокоугловых границ. Так как дефекты кристаллической решетки сильно влияют на формирование структуры сплавов при фазовых и структурных переходах, пластическую деформацию перед ними, а также в период их прохождения можно эффективно использовать для создания оптимальной структуры при ТЦО сталей и сплавов. Процессы пластического деформирования и ТЦО можно совмещать, но можно проводить и независимо друг от друга. При этом важно, чтобы фазовые и

структурные превращения проходили в новых, измененных условиях, характеризующихся повышенной плотностью дефектов, создаваемых пластической деформацией. Так, в опытах с предварительной холодной деформацией ТЦО возрастает число центров образующейся γ -фазы и, как следствие, интенсивно измельчается зерно аустенита. Кроме того, при деформировании в межкритическом интервале температур в результате динамического $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения можно значительно ускорить процесс перекристаллизации, сильно наклепать составляющие структуры и измельчить зерно.

Таким образом, использование пластической деформации может быть эффективно при ТЦО, проводимой в области перлитных, бейнитных и мартенситных превращений, а также при старении и циклировании в области температур переменной растворимости химических элементов в твердом растворе [3].

Изложение концепции исследований.

Изменения в структуре сталей и сплавов после быстрых нагревов и охлаждений вызваны двумя причинами. Одна из них не связана с фазовыми превращениями, а другая обусловлена особенностями фазовых переходов в условиях быстроменяющейся температуры. До и после ТО поликристаллический материал представляет собой набор различных по концентрации участков, поэтому в работе применили статистический анализ распределения химических элементов. Из полученных данных концентраций твердого раствора строили гистограммы распределения, определяли среднее значение концентрации химического элемента в твердом растворе, дисперсию среднего значения концентрации, характеризующую структурную однородность материала, а также коэффициент асимметрии, по которому судили о характере распределения.

Исследования показали, что при быстром нагреве рост аустенитного зерна происходит медленно и поэтому нагрев до высоких температур (до 1000°C) не ведет к интенсивному увеличению зерна. Критическая температура A_{c1} при ускорении нагрева возрастает и «размывается» так, что появляется необходимость фиксировать и впоследствии учитывать значения температуры начала $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения A_{c1u} и температуру конца $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения A_{c1k} в процессе структурного превращения перлита в аустенит. Первоначально в нагреваемом сплаве при температуре A_{c1u} появляются первые, очень мелкие зерна аустенита в перлите. Аустенит зарождается на границах между пластинками цементита и феррита. Число зарождающихся зерен аустенита в объеме превращающегося перлита чрезвычайно велико. При дальнейшем нагреве наблюдается некоторое увеличение числа зерен аустенита, возникающих в основном вблизи дефектов в феррите. Установлено, что увеличение

размеров зерен идет при переменной температуре нагрева в 3 раза медленнее, чем в изотермических условиях при соответствующей температуре. При условии, когда скорость роста новой фазы (аустенита) мала, а скорость зарождения зерен значительна, получается, что не только в момент, но и к концу $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения сохраняется сверхмелкозернистая структура. Дальнейший нагрев или выдержка при постоянной температуре приводит к быстрому укрупнению зерен аустенита.

Если произвести охлаждение (например, на воздухе) быстро нагретой стали на 10–15°C выше температуры точки A_{c1} , то вследствие обратной перекристаллизации образуется мелкое зерно перлита. При одном термоцикле феррит в доэвтектоидных сталях почти не претерпевает изменений. Но если произвести несколько таких нагревов и охлаждений, то вся ферритно-перлитная структура претерпевает изменение.

Тот факт, что в результате ТЦО резко измельчаются зерна в сталях и чугунах, требует своего объяснения. Наибольшую сложность вызывает понимание этого процесса в сталях с феррито-перлитной структурой. При попытках объяснить получение термоциклированием равномерной мелкозернистой структуры в доэвтектоидных углеродистых сталях необходимо исходить из механизма образования аустенита при ускоренных нагревах и его распада при последующих охлаждениях.

Большие сложности вызывает объяснение начальной стадии превращения перлита и части доэвтектоидного феррита при температуре, близкой к 750°C (A_{c1}), хотя температура фазового превращения α -железа в γ -железо при отсутствии цементита составляет 910°C. Известно, что первые зародыши аустенита при нагреве до точки A_{c1} образуются на межфазных границах феррита с цементитом. Установлено также, что превращение перлита в аустенит идет по мере «растворения» цементита и насыщения углеродом до 0,8% зон, прилегающих вначале к цементиту, а потом к новой фазе – аустениту. По мере насыщения новой фазы углеродом – до 0,8% и более, идет дальнейшее превращение феррита в аустенит. Этот диффузионный механизм превращения перлита (цементита + феррита) в аустенит хорошо изучен и не вызывает сомнений, если скорость нагрева меньше 1°C/мин. При малой скорости нагрева дефекты кристаллического строения исходных структур исчезают еще до начала превращения.

Бездиффузионное $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение обусловлено двумя факторами.

1. Немаловажное значение для появления бездиффузионного механизма превращения части феррита в аустенит после точки A_{c1} перлитно-аустенитного превращения имеют дефекты, искажения кристаллического строения феррита в его приграничных зонах. Эти дефекты и межфазные напряжения возникают при неполном структурном

превращении, т. е. тогда, когда перлит претерпевает превращение, а феррит запаздывает с превращением. В этом случае ослабевают внутрикристаллические силы взаимодействия атомов в поверхностных слоях контактирующих фаз. Однако известно, что при нагреве исчезающая фаза (феррит) теряет устойчивость, энергию взаимодействия атомов, а новая (аустенит) – увеличивает свою внутреннюю энергию.

2. При взаимодействии с аустенитом кристаллическая решетка феррита, будучи неустойчивой и «податливой» при температуре выше точки A_{c1} , оказывается энергетически подготовленной к перестройке (превращению) в аустенит – высокотемпературную фазу. Предрасположенность феррита к превращению способствует течению этого процесса по бездиффузионному механизму.

Указанные причины создают условия для бездиффузионного образования аустенита в приграничном феррите под воздействием более низкой температуры, чем 910 C . Аустенит, возникающий по бездиффузионному механизму, первоначально неустойчив. Однако в силу большой растворимости углерода в нем происходит насыщение аустенита углеродом и стабилизация кристаллической структуры. Итак, при ускоренном нагреве конструкционной стали до температуры выше точки A_{c1} образуется больше, чем обычно, мелкозернистого аустенита. Процесс обратного структурного превращения при охлаждении от указанного нагрева идет неидентично преобразованию, которое происходит при охлаждении после выдержки при данной температуре или после медленного нагрева. Отличие состоит в том, что зерна аустенита имеют, во-первых, больший объем, чем в равновесном состоянии при A_{c1} , и, следовательно, меньшую удельную концентрацию углерода; во-вторых, аустенит мелкозернистый; в-третьих, в приграничных с ферритом областях аустенит содержит больше углерода (результат термодиффузии и диффузии при распространении $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения феррита) и поэтому там он более устойчив.

В процессе охлаждения стали с такой неоднородной структурой аустенита распад его происходит следующим образом: вначале распадаются на феррит и перлит те мелкие зерна аустенита, которые имеют меньшую концентрацию углерода, т.е. внутренние. Этому процессу немного способствует и то, что температура внутренних (центральных) в семействе аустенитных зерен несколько ниже, чем крайних. Мелкие зерна аустенита, граничащие с ферритом, подогреваются от перегретого феррита. Таким образом, распад зерен аустенита при охлаждении от нагрева начинается не с границ зерен $A - \Phi$, а внутри них, т. е. начинается выделением феррита в центральной части аустенитных зерен. В результате полного охлаждения на месте названных аустенитных зерен в их прежних границах образуется так называемый псевдоперлит, содержащий углерода меньше 0,8 %. Так, в результате

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

одного быстрого нагрева стали до температуры несколько выше точки A_{c1} с последующим охлаждением получим структуру не смеси феррита и перлита ($\Phi + \Pi$), как обычно, а состоящую из зерен феррита и мелкозернистой смеси перлита и феррита, т. е. $\Phi + (\Phi + \Pi)$. Так, первый цикл нагрева и охлаждения всего лишь частично измельчает структуру, является шагом к полному измельчению зерен в стали.

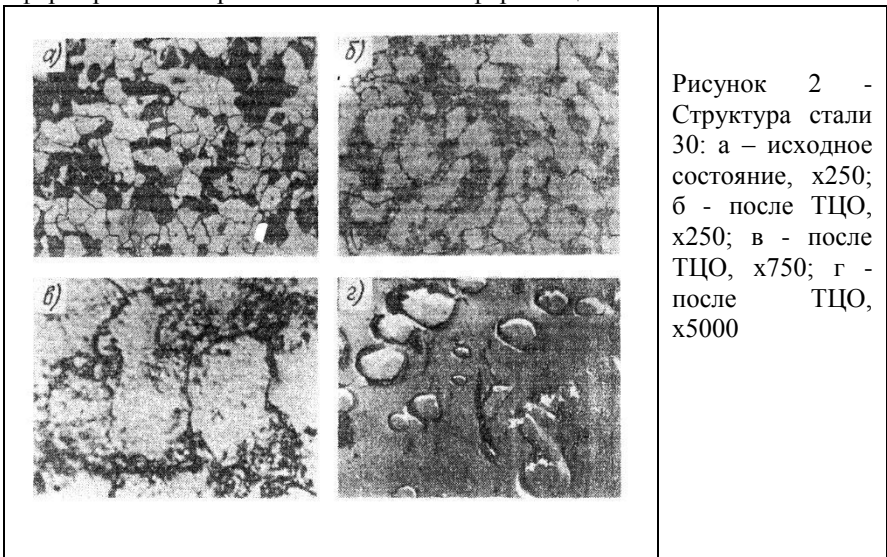
При повторном нагреве стали аустенитизация перлита происходит известным образом. Однако при этом нагреве возникает метастабильный аустенит только в крупных зернах феррита, точнее на границе с аустенитом. Мелкие зерна аустенита, находящиеся внутри прежнего псевдоперлита (т. е. внутри мелкозернистой перлитно-ферритной смеси), в процессе превращения перлита в аустенит имеют меньшую температуру, чем периферийные, граничащие с ферритом. Эта разница в температурах происходит в силу поглощения тепловой энергии при $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращении, которое начинается при нагреве в тех зернах перлита, содержание углерода в которых выше. А повышенное содержание углерода, как уже отмечалось, содержится в приграничных с ферритом зонах псевдоперлита. Начавшаяся аустенитизация, поглощая тепло, сдерживает поток тепловой энергии в центральные зоны псевдоперлита. Большие зерна оставшегося (исходного) феррита продолжают разогреваться, тогда как мелкие зерна феррита в псевдоперлите остаются некоторое время при постоянной температуре $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения. При этих условиях (температура феррита больше температуры ферритных зерен псевдоперлита) дальнейшая аустенитизация идет направленно – аустенитизируется перегретый (крупный) феррит. Причинами такой аустенитизации являются указанная разница в температурах при быстром нагреве и термодиффузия углерода в аустените в более нагретую, приграничную с ферритом зону.

В процессе охлаждения стали после второго нагрева кинетика распада аустенита аналогична описанной выше. Последующие циклы постоянно охватывают эвтектоидным превращением весь структурно-свободный феррит. Так, путем последовательных нагревов до температур несколько выше точки A_{c1} и охлаждений на воздухе до комнатных температур создается мелкозернистая структура в стали (рис. 2.) и соответствующее улучшение ее механических свойств. Однако нет смысла производить все охлаждения до комнатных температур. Структура пластинчатого перлита при охлаждении полностью формируется при температуре порядка 600°C . Дальнейшее охлаждение на воздухе не изменяет структуры стали. Поэтому охлаждения при термоциклировании для получения мелкозернистой структуры можно, а с экономической точки зрения нужно, производить до температур на $50\text{--}80^\circ\text{C}$ ниже точки A_{r1} , а потом вновь нагревать. Охлаждение после последнего нагрева следует

осуществлять на воздухе до комнатной температуры [3].

Установлено, что чем больше скорость нагрева при ТЦО и меньше перегревы над точкой A_{c1} , тем мельче зерно в углеродистой конструкционной стали. Однако при этом возрастает необходимое число циклов. Следует заметить, что быстрый печной нагрев при ТЦО достигается садкой металла в перегретую печь. [3-5].

Известно, что перлит при охлаждении стали из состояния аустенита, формируется не в момент прохождения температуры A_{r1} . Формирование цементита - процесс диффузионный. Для того, чтобы молекулы Fe_3C «выстроились» в пластинки цементита, необходимы достаточное переохлаждение и некоторое время для диффузии. Это приводит к тому, что при охлаждении после прохождения температуры A_{r1} вначале возникают центры кристаллизации цементита, а α -решетка железа еще в значительной степени пересыщена углеродом. Дальнейшее охлаждение сопровождается направленным ростом цементитных включений, и только при температурах на 80–100 °С ниже точки A_{r1} заканчивается процесс формирования перлита с пластинчатой формой цементита.

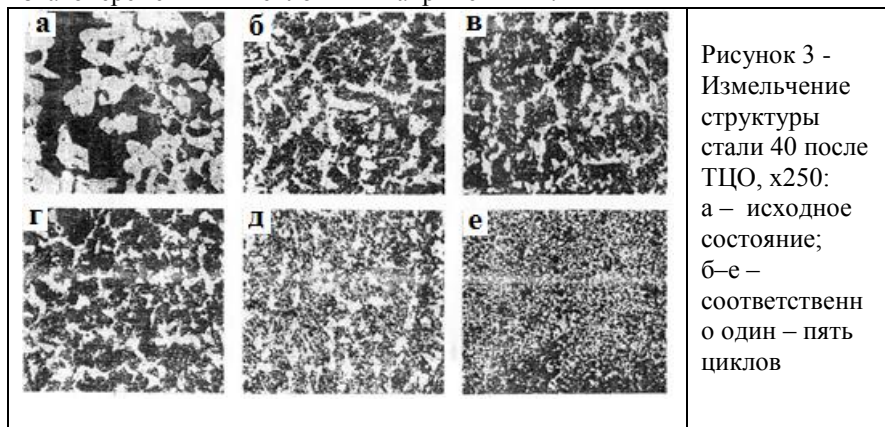


Таким образом, охлаждая быстро (в воде) с температур, например, на 30–50°С ниже точки A_{r1} , легко получить в стали структуру с преимущественно зернистой (шаровидной) формой цементита. При замачивании время охлаждения мало, и это мешает возможности диффузионного формирования пластинок цементита. Происходит выделение цементита, находящегося к моменту быстрого охлаждения в

стадии предвыделения, на существующие и вновь возникающие центры его кристаллизации [4].

Следовательно, для того чтобы в структуре стали получить цементит (или карбиды) не в виде пластинок, а в виде мелких зерен, необходимо в процессе среднетемпературных ТЦО нагрев вести до температуры несколько выше точки A_{c1} , охладить до начала перлитного превращения и, не дожидаясь его окончания, быстро охладить до комнатной температуры. В результате такой ТЦО в структуре, как инструментальных, так и конструкционных сталей (Рис 3) образуется зернистый перлит по всему объему металла, а не только на глубине закаленного и высокоотпущенного слоя. На рис. 2. приведены фотографии структур стали 30 до и после ТЦО [5–7].

В настоящее время ужесточение температурно-силовых режимов эксплуатации железнодорожного транспорта делает проблему надежности колес особенно актуальной, в частности, для высокоскоростных поездов при частых и резких торможениях. Цикл теплосмен в режиме «нагрев-охлаждение» оказывает существенное влияние на свойства стали. Долговечность металла будет зависеть от величины знакопеременных пластических деформаций, вызванных достаточно большими знакопеременными тепловыми напряжениями.



Исследовали влияние термоциклирования на изменение свойств отожженной среднеуглеродистой стали (0,55%С) с грубопластинчатым цементитом. Циклирование проводили по пилообразному циклу в интервале 20-600°C в установке типа Коффина на заземленных трубчатых образцах. Уже первые 10 циклов сопровождались резким увеличением коэрцитивной силы (H_c), ширины рентгеновской интерференции (220). Одновременно увеличилась микротвердость феррита и перлита. Возрастание H_c и $B_{(220)}$ свидетельствует о значительном

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

повышении плотности дефектов кристаллической решетки при термоциклировании. Причиной возрастания плотности дефектов могут являться микронапряжения, возникающие в результате различных коэффициентов линейного расширения феррита и цементита, магнитострикционных напряжений и микронапряжения, обусловленные возникновением температурных градиентов в образцах. Однако при термоциклировании свободного образца все вышеперечисленные причины возникновения дефектов кристаллической решетки маловажны, так как после 3000 циклов, каких-либо изменений свойств не наблюдали. Следовательно, основной причиной значительного изменения свойств является пластическая деформация, возникающая при термоциклировании заземленного образца. Это можно объяснить тем, что размножение дислокаций в феррите происходит менее интенсивно, чем в перлите, из-за разного числа источников дислокаций. При этом возможны процессы динамического старения и полигонизации феррита, начальных стадий его рекристаллизации, а также сфероидизации пластин цементита. Отпуск деформированных сталей при 450-550°C приводит к упрочнению и снижению пластичности, причем в ферритных сталях и в сталях с глобулярным цементитом этот процесс играет незначительную роль. Таким образом, упрочнение перлита можно объяснить суммарным воздействием описанных факторов.

При увеличении числа циклов с 10 до 300 продолжают возрастать H_c и $V_{(220)}$, а микротвердость феррита и перлита уменьшаться. Рост H_c и $V_{(220)}$ свидетельствует об увеличении плотности дислокаций, что должно приводить к увеличению микротвердости. Наблюдающееся снижение микротвердости перлита можно связать с началом коагуляции карбидных частиц.

Заключение.

При одном термоцикле феррит в доэвтектоидных сталях почти не претерпевает изменений. Ферритно-перлитная структура претерпевает изменение после нескольких нагревов и охлаждений.

Установлено, что чем больше скорость нагрева при ТЦО и меньше перегревы над точкой A_{c1} , тем мельче зерно в углеродистой конструкционной стали. Однако при этом возрастает необходимость увеличивать число циклов термообработки.

Приведен механизм структурообразования, объясняющий эти явления, и практические рекомендации по реализации процесса ТЦО. Такой подход дает возможность сформировать оптимальную структуру металла. При этом могут быть существенно расширены возможности в части получения материалов с заданными свойствами и совершенствование на этой основе машин, конструкций, отдельных узлов и деталей. Все это ставит ТЦО в разряд перспективных направлений в металлообработке.

Библиографический список

1. Ивашко В.В. Структурные изменения в металлах при ТЦО. Ленинград, 1990. – С.169–171.
2. Кидин И.Н. Фазовые превращения при ускоренном нагреве стали. М.: Металлургия, 1997. – 280 с.
3. Илларионов Э.И. Термоциклическая обработка металлоизделий. Ленинград, 1992. – С. 71–73.
4. Кидин И.Н., Липчин Т.Н. Циклическая термообработка сталей. Пермь, 1989. – С.62–68.
5. Шоршоров М.Х. Термоциклическая обработка сталей и сплавов. М.: Наука, 2004. – 186 с.
6. Федюкин В.К. Термоциклическая обработка сталей и чугунов. Л.: ЛГУ. 1997. – 193 с.
7. Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. Л.: Машиностроение, 1999. – 255 с.

Reference

1. Ivashko V.V. (1990). *Strukturnyye izmeneniya v metallakh pri TTSO [Structural changes in metals during thermal cycling metal treatment]*. Leningrad, 1990, 169–171. (In Russian).
2. Kidin I.N. (1997). *Fazovyye prevrashcheniya pri uskorennom nagreve stali [Phase transformations during accelerated heating of steel]*. Moskva: Metallurgiya, 1997, 280 p. (In Russian).
3. Illarionov E.I. (1992). *Termotsiklicheskaya obrabotka metalloizdeliy [Thermocyclic processing of metal products]*. Leningrad, 1992, 71–73p. (In Russian).
4. Kidin I.N. & Lipchin T.N. (1989). *Tsiklicheskaya termoobrabotka staley [Cyclic heat treatment of steels]*. Perm', 1989, 62–68p. (In Russian).
5. Shorshorov M.Kh. (2004). *Termotsiklicheskaya obrabotka staley i splavov [Thermocyclic treatment of steels and alloys]*. Moskva: Nauka, 2004, 186 p. (In Russian).
6. Fedyukin V.K. (1997). *Termotsiklicheskaya obrabotka staley i chugunov [Thermocyclic treatment of steels and cast irons]*. Leningrad: LSU, 1997, 193 p. (In Russian).
7. Fedyukin V.K. & Smagorinskiy M.Ye. (1999). *Termotsiklicheskaya obrabotka metallov i detaley mashin [Thermocyclic processing of metals and machine parts]*. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1999, 255 p. (In Russian).

О.М. Перков, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-8101-4054

І.О. Вакуленко, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-7353-1916

В.М. Кузьмичев, зав. отделом, ORCID 0000-0003-2057-3001

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

Термоциклічна обробка (ТЦО) металів – шлях до отримання оптимальних структури і властивостей

Анотація. Метою цієї роботи є вивчення можливості використання термічної циклічної обробки (ТЦО) металів для отримання структур, що визначають оптимальний комплекс механічних властивостей. Наведено

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2019. - Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii».* – 2019. – Vypusk 33

основні положення ТЦО металів з використанням періодично повторюваних циклів нагріву та охолодження. Метод ТЦО, як спосіб термообробки, заснований на постійному накопиченні від циклу до циклу позитивних змін в структурі металів. Дослідження показали, що при швидкому нагріванні зростання аустенітного зерна відбувається повільно, і тому нагрів до високих температур (до 1000°C) не веде до інтенсивного збільшення зерна. Встановлено, що збільшення розмірів зерен йде при змінній температурі нагріву в 3 рази повільніше, ніж в ізотермічних умовах при відповідній температурі. За умови, коли швидкість росту нової фази (аустеніту) мала, а швидкість зародження зерен значна, виходить, що до кінця $\alpha \rightarrow \gamma$ перетворення зберігається дрібнозерниста структура. Подальший нагрів, або витримка при постійній температурі, призводить до швидкого укрупнення зерен аустеніту. Якщо провести охолодження (наприклад, на повітрі) швидко нагрітої сталі на $10-15^{\circ}\text{C}$ вище температури точки A_{c1} , то внаслідок зворотного перекристалізації утворюється дрібне зерно перліту. При одному термоциклі феррит в доевтектійних сталях майже не зазнає змін. Але якщо зробити кілька таких нагрівань і охолоджень, то вся феритно-перлітна структура зазнає змін. Встановлено, що чим більше швидкість нагріву при ТЦО і менше перегріву над точкою A_{c1} , тим дрібніше зерно в вуглецевій конструкційній сталі. Однак, при цьому зростає необхідність збільшувати число циклів термообробки. Наведено механізм структуроутворення, що пояснює ці явища, і практичні рекомендації щодо реалізації процесу ТЦО. Такий підхід дає можливість сформулювати оптимальну структуру металу. При цьому можуть бути істотно розширені можливості в частині отримання матеріалів із заданими властивостями і вдосконалення на цій основі машин, конструкцій, окремих вузлів і деталей. Все це ставить ТЦО в розряд перспективних напрямків в металообробці.

Ключові слова: термічна циклічна обробка, сталь, структурні перетворення, аустеніт, перліт, ферит

O.N. Perkov, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-8101-4054

I.A. Vakulenko, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-7353-1916

V.M. Kuzmychov, зав. відделом, ORCID 0000-0003-2057-3001

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Thermocyclic treatment (tcT) of metals - way for getting optimum structures and properties

Summary. The aim of this work is to study the basic principles of thermal cyclic processing (TCT) of metals to obtain structures that determine the optimal complex of mechanical properties. The basic provisions of metal heating centers using periodically repeated heating and cooling cycles are given. The TCT method, as a heat treatment method, is based on constant accumulation from cycle to cycle of positive changes in the structure of metals.

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

Studies have shown that with rapid heating, the growth of austenitic grain occurs slowly and, therefore, heating to high temperatures (up to 1000⁰C) does not lead to an intensive increase in grain. It has been established that grain size increases at a variable heating temperature 3 times slower than under isothermal conditions at the corresponding temperature. Provided that the growth rate of the new phase (austenite) is small and the nucleation rate of grains is significant, it turns out that by the end of the $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation, a fine-grained structure is retained. Further heating or holding at a constant temperature leads to a rapid coarsening of austenite grains. If cooling (for example, in air) of rapidly heated steel is performed 10–15⁰C higher than the temperature of the Ac₁ point, then fine perlite grain is formed due to reverse recrystallization. With one thermal cycle, ferrite in subeutectoid steels almost does not undergo changes. But if several such heating and cooling are performed, then the entire ferrite-pearlite structure undergoes a change. It has been established that the higher the heating rate during heating and heating and the less overheating above Ac₁, the finer the grain in carbon structural steel. However, this increases the need to increase the number of heat treatment cycles. The mechanism of structure formation explaining these phenomena and practical recommendations on the implementation of the process of the technical and economic process are presented. This approach makes it possible to form the optimal metal structure. At the same time, opportunities can be significantly expanded in terms of obtaining materials with desired properties and improving on this basis machines, structures, individual units and parts. All this puts TCT in the category of promising areas in metalworking.

Keywords: thermal cyclic treatment, steel, structural transformations, austenite, perlite, ferrite

For citation: Perkov O.N., Vakulenko I.A., Kuz'michev V.M. Termotsiklicheskaya obrabotka (TTSO) metallov – put' k polucheniyu optimal'nykh struktury i svoystv. [Thermocyclic treatment (TCT) of metals is a way to obtain optimal structure and properties.]. *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii»*. [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 238-252. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-238-252

Статья поступила в редакцию сборника 15.11.2019 года, прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания редакционной коллегии сборника №2 от 23 декабря 2019 года)