

# ВЛИЯНИЕ МНОГОКРАТНЫХ НАГРЕВОВ И ОХЛАЖДЕНИЙ НА ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ И СТРУКТУРУ ОБРАЗЦОВ ИЗ МЕДИ

Э.В. Татаурова, С.Н. Тарасенко

Хорошо известно явление прогрессирующего разрушения металлов и сплавов в условиях повторного нагревания и охлаждения. Термическая усталость приводит к преждевременному выходу из строя валков станов горячей прокатки, изложниц, конструкций ракетной и ядерной техники, катодов плазматронов и др. В настоящее время предложено несколько теорий необратимого формоизменения металлов при термоциклической обработке (ТЦО). В результате термоциклического воздействия обнаруживают два вида дефектов - трещины и изменение формы детали и образца. Первое представление о разрушении металлов, испытывающих циклические изменения, были следующие - при нагревании температура отдельных объемов металла может измениться не одновременно, что приводит к расширению отдельных участков. В результате появляются напряжения. Если величина их достигает предела текучести, происходит пластическая деформация одного из участков. При повторении нагревов пластическая деформация будет накапливаться. Когда возможность течения будет исчерпана, произойдет нарушение сплошности - появиться трещина.

Многочисленные исследования по влиянию ТЦО с целью выяснения природы разрушения и формоизменения, установили, как увеличение, так и уменьшение основного размера образца, взятого в виде цилиндра, пластины или образца другой формы.

Предложено несколько теорий необратимого формоизменения металла при термоциклическом воздействии. Феноменологическая теория формоизменения, как результат релаксации температурных напряжений, предполагает наличие достаточно больших температурных напряжений, определенную зависимость физико-механических свойств от температуры. Термодинамическая теория предполагает формоизменение, как термодинамически необратимый процесс.

Считают, что неограниченное изменение размеров образцов может быть результатом ползучести в более прочном из двух зерен при высокой температуре цикла и пластической деформации в более слабом зерне при низкой температуре. В этой теории не предполагается перемещения по границам зерен.

В других работах рост поликристаллических образцов осуществляется за счет вязкого течения по границам зерен при высокой температуре и за счет деформации обратного знака, по кристаллографическим плоскостям более слабого зерна при низких температурах. Сильное зерно (расположенное неблагоприятно для сдвигов) не деформируется, за него происходит зацепление слабого зерна, которое релаксирует поочередно - то, сдвигается по границе, то деформируется.

Считают, что чем выше коэффициент термического расширения и меньше теплопроводность металла или сплава, тем выше напряжения, возникающие по сечению образца. Возникновение макро- и микронапряжений вызывает пластическую деформацию, наклеп, изменение размеров образца и образование внешних и внутренних трещин.

Вызывают формоизменения и влияют на него: интервал температур термоциклической обработки, верхняя температура цикла, время пребывания металла при высокой и низкой температуре, нижняя температура цикла, скорость нагрева и охлаждения образца, материал, химический состав, анизотропность решетки и различие в физических характеристиках по различным кристаллографическим направлениям, теплопроводность, форма, размеры образца, физико-механические свойства - прочность, предел текучести, пластичность металла.

Отмечают значительное влияние термоциклической обработки на изменение размера зерна. Однако оно оказывается не везде однозначным - в одних работах зафиксирован рост зерен, в других - наоборот, измельчение зерна.

Считают, что структура металлов при ТЦО формируется в несколько стадий: на первой стадии нагревы устраняют дефекты, присутствовавшие в металле в исходном состоянии. Под влиянием термических напряжений происходит образование новых дефектов - дислокаций, их скоплений, избыточных вакансий. В результате разупрочнение, имеющее место на первой стадии, сменяется упрочнением. На третьей стадии появляются микротрещины, прогрессирующие от цикла к циклу. Их развитие приводит к росту крупных магистральных трещин. Последовательность

## ВЛИЯНИЕ МНОГОКРАТНЫХ НАГРЕВОВ И ОХЛАЖДЕНИЙ НА ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ И СТРУКТУРУ ОБРАЗЦОВ ИЗ МЕДИ

стадий и их продолжительность зависят от материала и условий проведения ТЦО [1,2].

Считают, что при ТЦО металл получает избыток энергии, и будет стремиться к перестройке структуры таким образом, чтобы это привело к минимуму энергии. При этом, должна перестраиваться дислокационная структура, как носитель запасенной энергии.

Все изменения в дислокационной структуре обусловлены действием нестационарного температурного поля, и можно разбить на три стадии. 1 стадия - накопление несовершенств типа дислокаций, плотность которых достигает критического значения к 20-30 теплосмен. Это состояние характеризуется максимальной степенью беспорядка и максимальной величиной запасенной энергии. 2 стадия - протекание полигонизация, которая приводит к формированию устойчивой дислокационной структуры с распределением дислокаций по границам субзерен. Эта стадия характеризуется минимумом запасенной энергии. 3 стадия - изменение во вновь сформированной дислокационной структуре ростом угла разориентировки и его стабилизации, а также формированием второго порядка. Эта стадия предшествует разрушению металла.

Вопрос о характере развития трещин в металлах недостаточно изучен. Наблюдали развитие трещин как по границам, так и внутри зерен, а также сетку на поверхности детали.

Таким образом, имеющийся экспериментальный материал по термоциклической обработке металлов свидетельствует о сложности явлений, происходящих в процессе смен температур во времени.

Медь широко распространена в энергетических установках, поэтому детальное изучение поведения меди при многократных нагревах и охлаждениях имеет актуальное значение.

В настоящей работе представлены результаты исследований влияния максимальной температуры цикла, длительности выдержки при максимальной температуре на формоизменение для меди марок М1 и М2, на цилиндрических образцах, диаметра 5 и 7 мм. Исходное состояние образцов было различное и достигалось различными скоростями нагрева до температуры отжига. Максимальная температура достигала 500, 600, 680, 830 °С, что для меди составляет –  $0,56T_{пл}$ ,  $0,64T_{пл}$ ,  $0,7T_{пл}$ ,  $0,8T_{пл}$ . Для изготовления образцов была взята катанка. Нагрев образцов осуществлялся в соляной ванне следующего состава: 48 вес.ч.  $BaCl_2$  + 30 вес.ч.

$NaCl$  + 22 вес.ч.  $CaCl_2$  с выдержкой при максимальной температуре цикла в течении 3, 5, 10, 30 минут. По истечении времени выдержки образцы извлекались из соляной ванны и охлаждались в воде при температуре 20 °С, просушивались струей воздуха в течение 1,5 минут, затем цикл повторялся.

Были сняты кривые расширения на dilatометре, в качестве эталона использовалась отожженная медь, а в качестве образца – образец после ТЦО. В результате выявлено, что образец в процессе нагрева расширяется неодинаково с эталоном. В зависимости от режима ТЦО этот эффект может изменяться, чем выше максимальная температура при ТЦО и больше сделано теплосмен, тем больше был эффект на dilatометре.

После dilatометрического анализа образцы были разрезаны и на продольных сечениях исследована микроструктура. В центральной части образца поры по границам зерен укрупнились, образовались несплошности. Изменение длины образцов при ТЦО, состоящей из быстрых нагревов и охлаждений, зависело от температурного интервала ТЦО. Чем выше верхняя температура цикла, тем больше увеличение длины за одинаковое количество теплосмен. Эта зависимость носит нелинейный характер.

При быстром нагреве образца он неоднородно воспринимает температуру окружающей среды. Поверхностные слои, соприкасающиеся с ней, нагреваются в первую очередь. Центральная часть образца прогревается до заданной температуры позднее. Прогрев центральной части образца будет зависеть от теплопроводности, теплоемкости, температуропроводности материала и диаметра образца. Вследствие неодновременного прогрева в образце будут возникать напряжения, величина которых определяется не только перечисленными параметрами, но и температурой нагрева, коэффициентом термического расширения меди, длиной образца, механическими характеристиками, исходным состоянием образца. По мере прогрева образца напряжения растяжения (максимум) перемещаются от переходной зоны к оси образца. При прогреве образца до заданной температуры напряжения должны быть сняты, а дефекты кристаллического строения, возникшие в процессе быстрого нагрева, должны перераспределиться. Кроме того, при максимальной температуре должно увеличиться число вакансий и примесных атомов в теле зерна. Они должны переместиться в равновесное для данных условий положение.

По истечении времени выдержки, при быстром охлаждении поверхностные слои остывают в первую очередь. При этом возникают напряжения растяжения вдоль оси и по касательной, а в центральной части образца – слоисто-напряженное состояние сжатия.

Как показали микроструктурные исследования, глубина поверхностной зоны в меди составляет 0,7-1,0 мм и на ее границе обнаружены несплошности, которые располагаются параллельно образующей. По-видимому, вдоль образующей в переходной зоне напряжения максимальные, что и определяет перемещение поверхностных слоев относительно центральной части.

При остывании образца в нем фиксируются вакансии, дислокации и примеси в тех местах, где они были при максимальной температуре цикла. Поскольку образец диаметром 5 мм остынет быстрее, чем образец 7 мм, в образце диаметром 5 мм зафиксируется большое количество вакансий. Это и обуславливает прирост длины образца диаметром 5 мм больше, чем образца диаметром 7 мм.

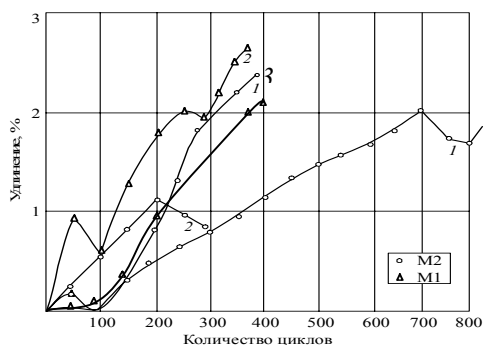


Рис.1. Изменение длины образцов: 1 – время выдержки 3 мин, 2 – время выдержки 10 мин, 3 – время выдержки 30 мин при максимальной температуре 680 °С

Для выяснения влияния степени частоты меди на формоизменение и разрушение при ТЦО были взяты образцы из меди разных марок. Для М1 содержание примесей –0.1%, для М2 – 0.3%. На рис.1 представлено удлинение образцов при различных временах выдержки при максимальной температуре в зависимости от количества циклов. Микроструктурные исследования показали, что увеличение примесей приводит к более быстрому

разрушению образцов. В меди марки М1 в результате ТЦО появляются поры. По мере увеличения количества теплосмен число пор увеличивается. При увеличении времени выдержки процесс увеличения пор идет более интенсивно.

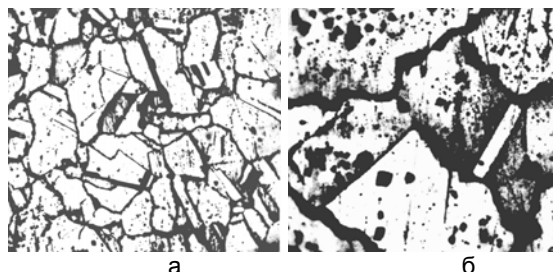


Рис.2. Микроструктура меди после ТЦО: а – образование пор, б – образование разрушений по границам зерен

Общим для всех режимов и марок меди является то, что при ТЦО образцы увеличиваются в длину, при этом наблюдается замедление роста образцов, а в некоторых случаях – временное укорочение. Если учесть, что во время ТЦО происходит упрочнение меди, то это может привести к тому, что внутренние слои во время операции охлаждения испытывают большее сопротивление, когда остывшие, в первую очередь, поверхностные слои сжимают центральную часть. С другой стороны, при образовании какого-то количества несплошностей, микротрещин теряется контакт между зернами. Несмотря на то, что процесс порообразования продолжается и происходит дробление зерен, образец, тем не менее, на какое-то время приостанавливает свой рост или немного укорачивается.

Время выдержки влияет на величину формоизменения – чем длиннее выдержка, тем раньше выявляется снижение темпа роста на кривой удлинение-число теплосмен.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Татаурова Э.В. Влияние ТЦО на изменение размеров и структуру образцов меди // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1990. - № 2. - С. 55-56.
2. Татаурова Э.В. Влияние состава и структуры сплава на формоизменение и образование трещин при термоциклической обработке// Проблемы прочности. - 1989. - № 5. - С. 98-101.