

конструкции является исключение сварных соединений из области активной зоны и сокращение кольцевых сварных соединений.

Fabrication of the Lower Half of the Reactor Vessel

V.A. Morozov

*The Volgodonsk Branch of Joint Stock Company «Engineering Company «AEM-technology» (The Branch of JSC «AEM-technology» «Atommash»), Volgodonsk, Rostov region
morozov_va@atommash.ru*

Abstract – The report reveals the manufacturing technology of the lower half-shell of the reactor from one shell and the bottom, instead of three separate shells and the bottom. As a result, a reduction in production time and an improvement in the strength of the semi-shell and the reactor in the well.

Keywords: forging, hot forming.

УДК 539.382.4: 539.422; 536.94

Анализ характера разрушения конструкционных сталей при упруго-пластическом поведении с позиций нелинейной термодинамики

Е.И. Колоколов

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовской обл.

Показано, что образцы с кольцевым надрезом, изготовленные из конструкционных сталей, подвергаемые растяжению в условиях их упруго-пластического поведения, проявляют себя как открытая термодинамическая система, которая при критических значениях управляющих параметров теряет устойчивость в результате чего происходит хрупкое разрушение. Этими параметрами являются значения статической и динамической составляющих упругой энергии, сформированные в процессе нагружения. Разрушение сколом при квазихрупком разрушении начинается в слабом звене в результате пластической неустойчивости, связанной с образованием пластического шарнира, после которой суммарный уровень упругой энергии достигает значения, достаточного для разрыва межатомных связей в очаге. Последующий рост магистральной трещины осуществляется за счет постоянной подпитки упругой энергией, освобождаемой при разрыве связей и волновом перераспределении поля упругих искажений в изделии.

Ключевые слова: теплота и работа, энергообмен, диссипативная система, искажения кристаллической решетки, принцип Ле-Шателье, внешние и внутренние шумы, волны напряжений, критическая ситуация, самоорганизация, запас упругой энергии, квазихрупкое разрушение сколом, пластический шарнир, управляющие параметры.

Согласно термодинамическим принципам, материальные объекты условно разбивают на термодинамическую систему (ТДС) и окружающую (внешнюю) среду. Все основные свойства системы проявляются при ее энерго- и массообмене с окружающей средой, осуществляющемся в виде теплоты Q и работы W , которые являются двумя основными видами функций термодинамических процессов. Общая черта обоих видов энергообмена состоит в том, что они проявляются только в процессах взаимодействия систем. В механической системе, в соответствии с нелинейной термодинамикой (НЛТ), энергообмен посредством передачи теплоты, связанный с осреднением характеристик неупорядоченного, хаотического движения микрочастиц, составляющих систему, осуществляется посредством индивидуальных тепловых колебаний атомов и диффузии и называется диссипативным способом передачи энергии. Энергообмен, осуществляемый посредством совершения

работы, – это упорядоченный макропроцесс, в ходе которого движения элементов системы согласованны, происходит посредством распространения упругих колебаний (волн).

Термодинамическими системами можно управлять, изменяя действующие на них внешние факторы (управляющие параметры). Если наращивать поток энергии, то физическую систему можно далеко сместить от состояния термодинамического равновесия. В неравновесной среде в условиях диссипации энергии, поступающей извне, может возникнуть устойчивое состояние. Такие системы называются диссипативными. При критических значениях управляющих параметров, диссипативная система может достигнуть такой степени неравновесности, при которой она теряет устойчивость. Возникшая критическая ситуация может разрешиться путем быстрого перехода системы в одно из возможных устойчивых состояний. Этот переход является актом самоорганизации системы.

Процесс самоорганизации зависит от наличия в системе «шумов» (флуктуаций), воздействие которых в существенной степени ускоряет этот процесс. Эти возмущения, делятся на два класса: создаваемые внешней средой и воспроизводимые самой системой. Внутренний шум системы обусловлен тепловым движением частиц, а внешний – связан с их упорядоченным движением. Все эти шумы являются следствием реакции системы на внешнее воздействие. Некоторые из них могут быть настолько сильными, что передают ТДС свои свойства, изменяя, по сути, режим её существования. В таких случаях можно сказать, что диссипативной называется ТДС, по которой распространяются (и рассеиваются) возмущения.

Для того, чтобы правильно применить принципы НЛТ к деформации и разрушению конструкционных материалов, необходимо сформулировать непротиворечивую физическую картину их поведения, в которой действуют механические нагрузки, осуществляются перемещения, наблюдается энерговыделение. При приложении механических нагрузок (F) в кристал-ле появляются упругие искажения кристаллической решетки (рис. 1), которые согласно пружинной модели (a) выражаются в увеличении расстояния между атомами (b) под действием нормальных напряжений – σ и изменении угла между атомными плоскостями (ϵ) при действии касательных напряжений – τ . Только такие искажения наблюдаются в идеальных кристаллах при небольшой величине нагрузки. Фактически при приложении к образцу растягивающих нагрузок в каждом зерне одновременно возникают нормальные и касательные напряжения и того, и другого типа согласно схеме, приведенной на рисунке 1. По мере роста уровня искажений увеличивается запас упругой (потенциальной) энергии натянутах межатомных связей.

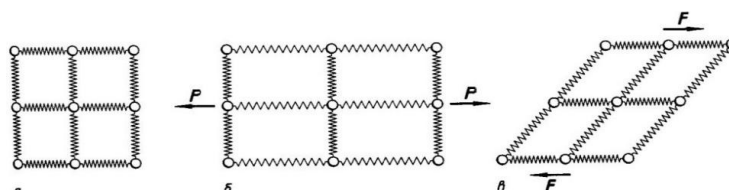


Рисунок 1 – Пружинная модель кристаллической решетки

Механический объект, подвергающийся внешнему нагружению, является открытой ТДС, подчиняющейся законам НЛТ. Для такой системы, вполне применим принцип Лешателье: «Если ТДС выводится в результате внешнего воздействия из состояния равновесия, в ней развиваются такие процессы, которые противодействуют внешнему воздействию и стремятся его ослабить». Реальную картину процессов, протекающих в механической ТДС при изменении запаса упругой энергии, накопленной кристаллической решеткой, можно проследить, анализируя физические явления, осуществляющиеся на различных стадиях и условиях нагружения.

Рассмотрим цилиндрический образец с кольцевым надрезом, растягиваемый квазистатической нагрузкой в условиях его упруго-пластического поведения. В соответствии с принципами НЛТ об осуществлении энергообмена путем совершения работы (W), сразу после начала активного растяжения образец находится в динамическом неравновесном состоянии, которое вызвано передачей нагрузки в виде последовательности волновых импульсов растяжения небольшой амплитуды. Степень неравновесности растет по мере роста нагрузки до момента разрушения в т. 3 (рис. 2) в соответствии с увеличением запаса упругой энергии натянутых межатомных связей в области концентратора напряжений и соответствует площади треугольника 3-4-5. При росте нагрузки одновременно увеличивается и уровень внешнего шума, являющегося следствием реакции системы на внешнее воздействие. В результате, в образце при росте нагрузки растут как запас статической упругой энергии, так и уровень вибрационного воздействия, в виде волновых импульсов растяжения и внешнего шума, которые ускоряют действие происходящих в твердом теле процессов.

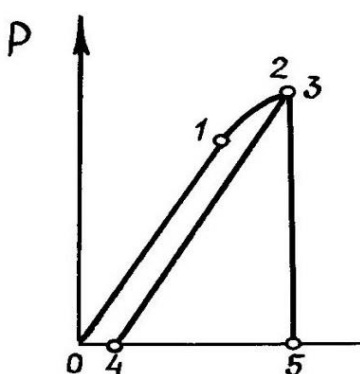


Рисунок 2 – Диаграмма растяжения образца при его упруго-пластическом поведении

При увеличении нагрузки на диаграмме растяжения появляется нелинейный участок (1-2; рис. 2), обусловленный достижением критического уровня упругих искажений кристаллической решетки в зернах под действием касательных напряжений. При этом наблюдается локальная потеря устойчивости в виде образования множества свежих краевых дислокаций в наиболее благоприятно ориентированных системах скольжения на границах зерен, расположенных в области кольцевого надреза. В результате согласно НЛТ происходит локальная самоорганизация путем формирования и развития устойчивых полос Чернова-Людерса (ПЧЛ). По мере увеличения нагрузки образуются новые ПЧЛ в системах скольжения зерен с менее благоприятной ориентировкой. Последовательность таких локальных актов самоорганизации в зоне кольцевого надреза приводит к формированию двух пластических конусов, состоящих из лепестков ПЧЛ, ориентированных под углом около 45° в направлении действия максимальных касательных напряжений (рис. 3). При росте нагрузки происходит увеличение длины ПЧЛ в сторону оси образца вплоть до момента, когда в точке 2 диаграммы произойдет смыкание полос, исходящих из противоположных участков надреза (рис. 3).

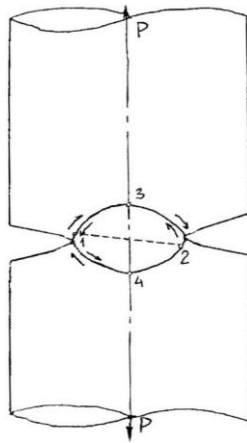


Рисунок 3 – Формирование пластического шарнира при растяжении цилиндрических образцов с острым надрезом

При нагрузке, соответствующей этому моменту, возникает новая критическая ситуация, заключающаяся в общей потере устойчивости. Это происходит вследствие смены упругого поведения системы на пластическое из-за появления степени свободы для пластической деформации в момент смыкания пластических зон, образованных встречными ПЧЛ. В соответствии с НЛТ под действием нагрузки в системе происходит еще одна самоорганизация, заключающаяся в резком синхронном смещении половинок образца вдоль поверхности образовавшегося при смыкании ПЧЛ пластического шарнира (ПШ). Фактически, такая реакция системы заключается в образовании гигантской флуктуации, состоящей из набора дискретных волновых импульсов, которая играет определяющую роль в последующем сразу после этого хрупком разрушении по траектории *1-2* (рис. 3). Фактически, критическая ситуация складывается из двух последовательных событий (совпадающих с точками *2* и *3* на рис. 2): первое – достижение предельного уровня статической упругой энергии (площадь треугольника *3-4-5*), при котором наблюдается потеря устойчивости (точка *2*); второй – хрупкое разрушение сколом в очаге, которое происходит при достижении в нем критического уровня упругой энергии, включая ее динамическую составляющую в момент образования гигантской флуктуации (точка *3*). Этот критический уровень упругой энергии соответствует теоретической прочности в очаге разрушения. Размер флуктуации соответствует диаметру ПШ, т.е. охватывает всю зону концентрации напряжений. В литературе по механике разрушения это резкое смещение на диаграмме растяжения получило название «скачка» – *pop-in* и связывается непосредственно с хрупким разрушением.

Хрупкое разрушение сколом, сопровождающееся освобождением большей части упругой энергии натянутых связей, происходит в средней части сечения внутри ПШ (Рис. 3), не затронутой пластической деформацией. При этом максимальная степень искажений кристаллической решетки соответствует кольцевой области, прилегающей изнутри к границам ПШ, где и происходит образование очага хрупкого разрушения в слабом звене, выявленном «сканированием» этой области гигантской флуктуацией. В момент раскрытия микротрещины скола в очаге, от ее берегов и вершины начинают распространяться продольные и поперечные упругие волны большой амплитуды (рис. 4). В результате отражения, суперпозиции и образования волн Релея происходит вскрытие соседних участков и начинается автокаталитический процесс – трещина скола быстро растет за счет постоянной подпитки упругой энергией, освобождаемой при разрыве связей и волновом перераспределении поля упругих напряжений в изделии.

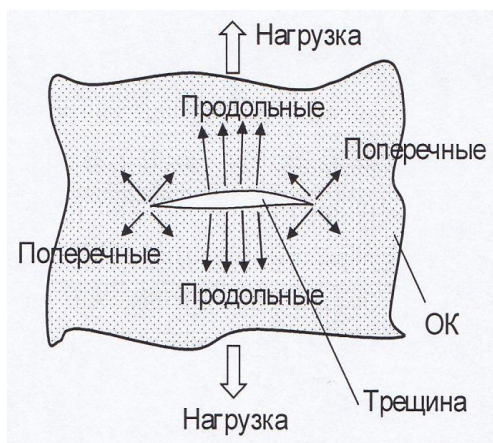


Рисунок 4 – Формирование волн напряжений при образовании трещины скола в очаге

Первым управляющим параметром, необходимым для развития хрупкого разрушения, является достигаемый в рабочем сечении образца статический уровень удельной потенциальной (упругой) энергии, обеспечивающий возможность развития магистральной трещины. Этому уровню соответствует запас упругой энергии (ΔA), накопленной в образце к моменту наступления пластической неустойчивости (треугольник **3-4-5** на кривой растяжения, рис. 2) и освобождаемой при хрупком разрушении с образованием зоны макроскопически хрупкого излома (ΔS). Полученная в результате деления ($\Delta A/\Delta S$) характеристика разрушения G_C , является мерой энергосодержания при хрупком или квазихрупком разрушении, приходящейся на единицу поверхности излома, и характеризует уровень трещиностойкости материала. При достижении первым управляющим параметром критического уровня, действие второго параметра (динамический фактор), управляющего процессом хрупкого разрушения, приводит к появлению микротрещины скола в слабом звене и последующему росту магистральной трещины в результате автокаталитического процесса. Динамический фактор зависит от условий нагружения и геометрии образца.

Analysis of Destruction Pattern of Structural Steels in Elastic Plastic Behavior from the Positions of Nonlinear Thermodynamics

E.I. Kolokolov

**Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI",
Volgodonsk, Rostov region
E.I.Kolokolov@yandex.ru*

Abstract – The article shows that samples with an annular notch made of structural steels subjected to stretching under the conditions of their elastic-plastic behavior, manifest themselves as an open thermodynamic system, which loses stability at critical values of control parameters, resulting in brittle fracture. These parameters are the values of static and dynamic components of elastic energy formed in the process of loading. The fracture by cleavage in the case of quasi-brittle fracture begins in the weak link as a result of plastic instability associated with the formation of a plastic hinge after which the total level of elastic energy reaches a value sufficient to break interatomic bonds in the source. The subsequent growth of the main crack is due to the constant feeding of elastic energy released when the bond is broken and the wave redistribution of the elastic distortion field in the product.

Keywords: heat and work, energy exchange, dissipative system, lattice distortions, Le Chatelier principle, external and internal noise, stress waves, critical situation, self-organization, elastic energy supply, quasi-brittle fracture with chipping, plastic hinge, control parameters.