

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СВАРКИ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ АЭС ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

А.И. Трофимов, С.И. Минин, М.А. Трофимов, Д.А. Егоров
Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск



Представлено моделирование термического цикла процесса сварки с помощью программы SYSWELD, позволяющее оптимизировать процесс сварки с учетом воздействия ультразвука, что дает возможность повысить прочностные свойства сварных соединений оборудования АЭС.

Ключевые слова: сварка, моделирование, ультразвук, деформация, остаточные напряжения, трубопроводы АЭС, оборудование АЭС.

Key words: welding, simulation, ultrasound, deformation and residual stress, nuclear power plants piping, nuclear power plants equipment.

Применение компьютерных технологий значительно расширяет возможности вычислительного эксперимента, что, в частности, дает возможность из множества вариантов технологии (термического цикла) выбрать оптимальную или прогнозировать результат сварки.

Основным достижением современного программного обеспечения является высокая точность расчетов и большой объем информации. В программах, предназначенных для моделирования сварных соединений, реализована возможность оптимизации процесса сварки оборудования и трубопроводов АЭС. Актуальной задачей является снятие остаточных напряжений, в том числе под воздействием ультразвука, в зоне термического влияния в процессе сварки.

Одной из таких программ является SYSWELD – программный пакет, ориентированный на высококвалифицированных пользователей-аналитиков, позволяющий решать методом конечных элементов комплексные задачи сварки:

- оценить остаточную деформацию;
- минимизировать остаточные напряжения;
- учесть влияние геометрии материала;
- оценить фазовые превращения.

На величину остаточной деформации влияет последовательность сборки и наложения сварных швов. Моделирование позволяет предсказать возможную деформацию и минимизировать ее, уменьшить градиент температур и поверхностных напряжений. В результате можно увеличить срок службы изделий при данном количестве циклов нагружения.

© *А.И. Трофимов, С.И. Минин, М.А. Трофимов, Д.А. Егоров, 2012*

Программа позволяет проверить правильность конструкции и выбора материала изделия на ранних стадиях проектирования с целью получения оптимальных эксплуатационных характеристик.

Результатами применения SYSWELD являются

- сокращение стоимости производства;
- оптимизация проекта изделия;
- выявление всех факторов, ведущих к изменению формы, размеров и свойств изделия.

Моделирование сварного соединения в SYSWELD начинается с задания 2D-сетки. В процессе создания сетки указываются все необходимые геометрические параметры модели сварного соединения, а именно, ширина и толщина листов, площадь шва.

На рисунке 1 представлена 2D-сетка моделируемого таврового соединения.

Как только 2D-сетка создана инструментом «выдавливание», создается 3D-сетка (рис. 2).

После того как сетка модели, представляющая собой совокупность конечных элементов, создана, необходимо задать свойства материала свариваемых деталей и присадочного материала. Материал каждого из элементов сварного соединения

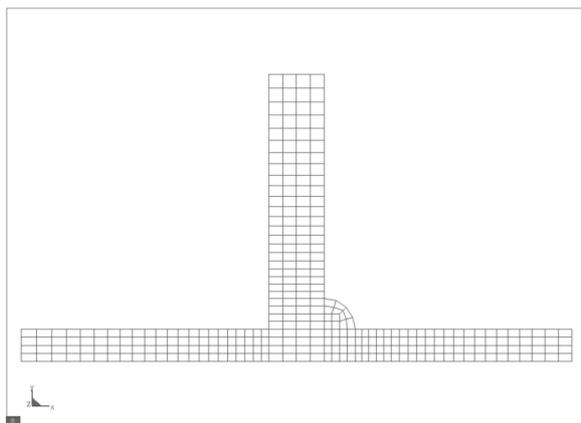


Рис. 1. 2D-сетка моделируемого таврового сварного соединения

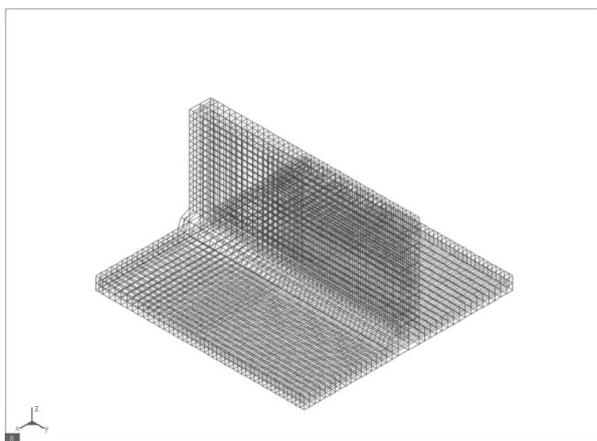


Рис. 2. 3D-сетка моделируемого таврового сварного соединения

берется из базы данных, содержащей большинство материалов, применяемых в промышленности.

Следующим этапом задаются источник теплоты и его параметры.

Источник теплоты моделируется в зависимости от значения объемной плотности энергии Q_v , Вт/мм³, приложенной к элементам, расположенным на траектории перемещения источника.

После задания всех параметров режима сварки производится наладка источника теплоты согласно необходимой величине проплавления свариваемых между собой деталей. Визуально величину проплавления можно оценить по рис. 3.

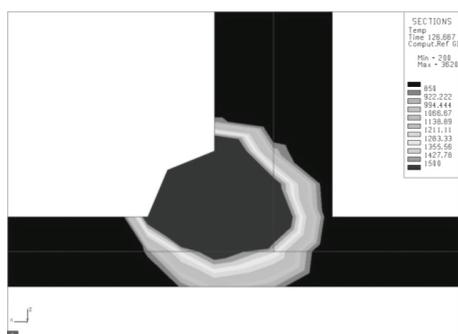


Рис. 3. Зона расплавленного металла и ЗТВ

Для определения термического цикла, проходящего в сварном шве и ЗТВ, берется узел, находящийся непосредственно на траектории перемещения источника теплоты. Именно на основании данных для этого узла и строится график изменения температуры во времени в сварном шве (рис. 4).

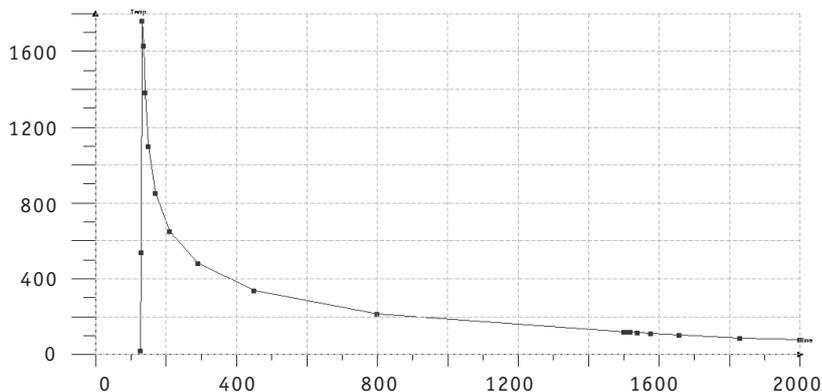


Рис. 4. График изменения температуры во времени в сварном шве

При моделировании была задана высоколегированная жаропрочная сталь мартенситно-ферритного класса марки 20X13.

По графику (рис. 4) можно определить скорость охлаждения металла шва и зоны термического влияния в интересующем нас интервале, а именно, 600–930°C – образование ферритно-карбидной структуры и 120–420°C – мартенситной.

Содержание углерода от 0,10 до 0,25% (как в стали 20X13) приводит к сдвигу в область более низких температурных границ превращения, в результате полное мартенситное превращение происходит при охлаждении со скоростью 1°C/с.

В связи с высокой склонностью к подкалке в сварных соединениях из стали 20Х13 возможно образование холодных трещин.

В результате моделирования была получена средняя скорость охлаждения величиной $0,77^{\circ}\text{C}/\text{с}$, что привело к существенному образованию мартенситной фазы, значение которой после охлаждения сварного соединения составило 94,2%. Кроме того, в этой зоне образуется небольшая доля феррито-перлитной смеси, бейнита и остаточного аустенита (рис. 5).

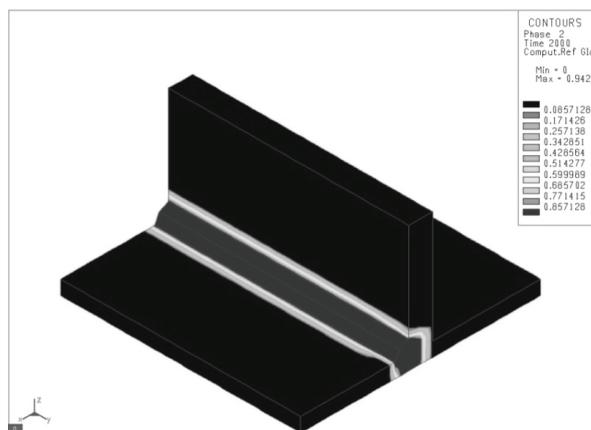


Рис. 5. Распределение мартенсита по сварному шву и ЗТВ

При прочих равных условиях начальную температуру ($T_{\text{нач}}$) принимаем равной 300°C . График изменения температуры во времени в сварном шве при условии подогрева сварного соединения представлен на рис. 6.

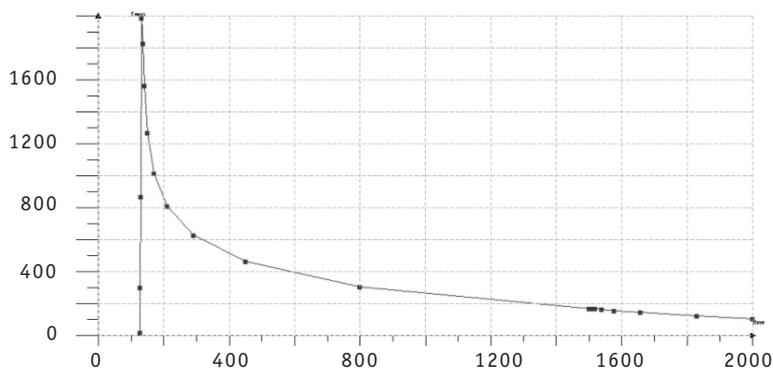


Рис. 6. График изменения температуры во времени в сварном шве при $T_{\text{нач}}=300^{\circ}\text{C}$

Средняя скорость охлаждения составила $0.325^{\circ}\text{C}/\text{с}$, что снизило процентное содержание мартенситной составляющей в сварном соединении после остывания. Лишь 20% аустенита в этом случае превращается в мартенсит в процессе остывания ниже 420°C . Значения напряжений как в поперечном, так и в продольном направлениях снизились. Однако применение предварительного локального подогрева необходимо дополнять последующей термообработкой с целью снятия остаточных напряжений, что не всегда может быть реализовано вне производственного цеха и всегда приводит к удорожанию технологии производства сварных изделий.

Более эффективным способом снятия остаточных напряжений в процессе сварки является применение ультразвука. Детальное описание метода и результаты его применения представлены в [1]. В результате воздействия ультразвука происходят следующие изменения структуры металла сварного соединения и зоны термического влияния:

- повышается однородность структуры металла сварного соединения;
- происходит более равномерное распределение неметаллических включений.

Как следствие, создание мелкозернистой однородной структуры приводит к повышению механических характеристик металла сварного шва.

При воздействии ультразвука на кристаллизующийся металл происходит интенсивная дегазация металла. Вначале газ высвобождается в виде мелких пузырьков в области низкого воздействия ультразвуковой волны, затем происходит их соединение в пузырьки больших размеров, которые всплывают на поверхность металла, захватывая с собой неметаллические включения. Дегазация металла сопровождается кавитацией. Это физическое явление приводит к повышению жидкотекучести металла, что исключает непровары, образование газовых пор и сварных трещин. Кроме того, повышение жидкотекучести металла позволяет проводить сварку при меньших значениях сварочного тока.

Исследования, проведенные на алюминиевых образцах, подвергаемых растяжению при разной интенсивности ультразвука и различных температурах, показали, что воздействие ультразвука вызывает снижение напряжений растяжения аналогично воздействию нагрева. При заданной интенсивности ультразвуковых колебаний 50 Вт/см^2 статическое напряжение в образце близко к нулю, что соответствует статическому пределу текучести. При этом плотность акустической энергии равна 10^{15} эВ/см^3 . Для достижения того же эффекта при нагреве требуется плотность тепловой энергии 10^{22} эВ/см^3 . Этот физический эффект объясняется тем, что акустическая энергия ультразвуковых колебаний поглощается, главным образом, дислокациями и границами зерен, которые являются носителями механизма пластической деформации металлов и сплавов. Тепловая же энергия распределяется относительно равномерно по всему объему металла.

Описанные результаты воздействия ультразвука на сварное соединение делают приоритетной задачу включения ультразвукового воздействия в алгоритм моделирования сварных соединений в программном пакете SYSWELD.

ВЫВОДЫ

Программный пакет SYSWELD позволяет

- выбрать оптимальный процесс сварки для каждого сварного соединения;
- задать необходимую последовательность наложения сварных швов и оптимальные условия закрепления деталей с целью минимизации остаточных напряжений и деформаций;
- подобрать оптимальные параметры воздействия ультразвука.

Литература

1. Трофимов А.И. Физические основы ультразвукового метода снятия остаточных напряжений в сварных соединениях металлов и сплавов. – М. Энергоатомиздат, 2009. – 239 с.

Поступила в редакцию 21.03.2012

УДК 621.039.586

Innovative Ultrasonic Technology to Improve the Life of NPP Equipment at its Manufacturing \A.I. Trofimov, S.I. Minin, M.A. Trofimov, Y.A. Kirillov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 7 pages, 11 illustrations. – References, 2 titles.

Provides a theoretical and experimental justification for the effects of ultrasound on the welds during welding equipment of nuclear power plants. As a result of exposure to ultrasound metal structure welding seam is fine-grained and homogeneous, excludes internal voltage in metal, is removal of residual stresses in in parajoint zone. This leads to a significant increase in strength characteristics and resource equipment of nuclear power stations. Impact of ultrasound technology are in the process of welding and surfacing.

УДК 621.039.586: 531.78.781

To Definition of the Tension of Metal Elements of the Power Equipment of the Nuclear Power Plants Acoustic Method \V.V. Hudasko, A.I. Trofimov, S.A. Kurkin, V.G. Malynkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 3 tables, 2 illustrations. – References, 18 titles.

In work the new acoustic method of definition of a tension of metal of elements of the equipment of the nuclear power plant is presented: based on effect акустоупругости; I consider-shchy deformation of microplatforms and micropieces; using more exact, than sushchest-vuet a method of definition of modules of the third order. This method allows to raise accuracy of measurement of a tension of metal of elements of the equipment of the atomic power.

УДК 621.039.58: 519.23/25

A Method for Detecting Failure Data Flow Heterogeneity of Nuclear Power Plant Equipment in Failure Flow \V.A. Chepurko, S.V. Chepurko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 5 tables, 2 illustrations. – References, 14 titles.

Describes the methodology that allows to evaluate the non-homogeneity parameter flow of failures of NPP equipment. Along with the point estimate of the reliability index, an algorithm of constructing its interval estimate allows you to check the statistical significance of hypotheses about the parameter. Algorithm is described in detail the decision criterion with a prescribed level of significance. Analyzed a number of test cases. To detect heterogeneity, processed real data on failures of recharge and boron control NPP VVER-1000 5 unit Novovoronezh.

УДК 532.526.4: 621.039.534

Validation of the Volume Flow Rate Measurements of RBMK Technological Channels Obtained with the «Shadr-32M» Flowmeter \E.F. Avdeev, V.I. Belozarov, A.Ya. Ustyuzhanin, V.V. Maximovsky, N.D. Rasenkov, N.E. Yushenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 6 pages, 1 table, 2 illustrations. – References, 6 titles.

The experimental data are processed for a set of «Shadr-32M» flowmeters used at Kursk NPP. The data are obtained for different coolant temperatures. The work is done to obtain a correlation between the measured flow rate and the actual one.

УДК 621.039.53

Optimization of the Welding Process Equipment and Piping Plant by Modeling of Welded Joints \A.I. Trofimov, S.I. Minin, M.A. Trofimov, D.A. Egorov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 5 pages, 6 illustrations. – References, 1 title.

Presented by the simulation of the thermal cycle of welding process on the example program SYSWELD. Modelling to optimize the welding process, including taking into account the effects of ultrasound, which will increase the strength properties of welded joints of NPP equipment.

УДК 621.039.534

Experimental Study of the Origin and Characteristics of Gas Flow in Cavitation Lead Coolant Innovative Nuclear Fast Reactor \A.V. Beznosov, P.A. Bokov, A.V. Lvov, O.O. Novozhilova, E.G. Novinsky, V.V. Lemekhov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 6 illustrations. – References, 1 title.