

С.Н.АХМЕДОВ, В.В.ТИХОМИРОВ, В.А.КОЗЛОВ, Е.Н.ПАНОВ,
А.Я.КАРВАЦКИЙ

Санкт-Петербургский государственный Политехнический Университет,
ООО "АЛКОРУС ИНЖИНИРИНГ",
НТТУ Киевский политехнический институт НИЦ ресурсосберегающих Технологий,

Исследование прочностных характеристик металлоконструкции катодного кожуха для электролизеров с обожженными анодами на силу тока 300 кА

Промышленное внедрение электролизеров с обожженными анодами на силу тока 280 кА началось в 1986 году в Сен Жан де Морьен (Франция) пуском серии, состоящей из 120 электролизеров [1]. По состоянию на 2005 год в мире работает около 15 заводов, на которых эксплуатируются электролизеры на силу тока 280...320 кА. В проектах этих заводов, как правило, указывается номинальная мощность в 300 кА.

Двадцатилетний опыт эксплуатации электролизеров на силу тока 300 кА показал, что обеспечение высоких технико-экономических показателей электролиза алюминия в значительной степени зависит от типа катодного устройства и, в частности, от конструкции металлического кожуха.

До середины 80-х годов прошлого века на электролизерах с обожженными анодами на силу тока до 180...200 кА успешно использовались цельносварные шпангоутные катодные кожухи. Средний срок службы таких электролизеров с цельносварными катодными кожухами достигал 8...9 лет.

При вводе в эксплуатацию первых опытных серий из электролизеров на силу тока 300 кА, была предпринята попытка использовать цельносварные катодные кожухи подобные применяемым на электролизерах на силу тока до 180...200 кА. В результате эксплуатации опытных серий был установлен повышенный процент досрочного входа электролизеров из строя. До 30% от числа пущенных электролизеров имело срок службы около 600 дней [1]. Первоначально не высокий срок службы пытались объяснить только качеством и типом угольных подовых блоков.

В дальнейшем для увеличения срока службы электролизеров был выполнен комплекс конструктивных изменений, включающий использование нового типа конструкции кожухов, модернизированной ошиновки, карбидокремниевой боковой футеровки, специальных огнеупоров: силиката кальция, высокоглиноземистых и высококремнистых огнеупоров, сухой барьерной смеси. Результатом такой модернизации явилось увеличение гарантированного среднего срока службы электролизеров до 5-ти лет.

Выполненные нами ранее исследования [2] касались сравнительного анализа прочностных характеристик различных конструкций для катодных кожухов электролизеров с обожженными анодами на силу тока 130 кА. Было рассчитано, что лучшими прочностными характеристиками обладают кожухи цельносварного

и составного типов. Рамно- и каркасно-шпангоутные кожухи имеют склонность к значительным деформациям торцовых стенок и днища.

Есть основания полагать, что при увеличении размеров кожухов, сопровождающем увеличению силы тока электролизеров, будет изменяться механизм работы металлоконструкций как системы. В теории конструирования машин и механизмов при характеристике системы в целом используется понятие податливости системы. Считается, что чем длиннее деталь и меньше ее поперечное сечение, момент инерции и модуль упругости материала, тем меньше фактическая сила, нагружающая деталь, и меньше нагрузка на звенья механизма [3].

В случае электролизера на силу тока 130 кА длина кожуха (по обечайке) составляет 7,2 м, а для электролизера на 300 кА – 15,8 м. При этом ширина кожухов отличается очень незначительно – 4,2 м и 4,18 м. Толщина стенок обечайки кожухов и геометрические размеры шпангоутов также близки. В результате, можно полагать, что податливость в поперечном направлении кожуха электролизера на силу тока 300 кА будет выше, чем у кожуха электролизера на 130 кА.

Для пускового режима работы электролизера, когда происходит температурное расширение металла, подовых блоков, огнеупорного цоколя и стальных блюмсов [4] большая податливость кожуха может рассматриваться как положительный фактор. В режиме эксплуатации, наоборот, требуется большая жесткость кожуха, т.к. в этом случае необходимо обеспечивать обжатие подины катодного устройства, для того чтобы воспрепятствовать фильтрации металла, электролита и проникновению щелочных металлов в угольные подовые блоки.

Для электролизеров на небольшую силу тока, например, 130 кА, выполнение требования податливости кожуха и его жесткости в разные периоды эксплуатации, как показали предыдущие исследования [2], обеспечивалось на цельносварных и составных типах кожухов.

В случае мощных электролизеров на 300 кА большая исходная конструктивная податливость кожуха шпангоутного типа может вызывать достаточно большие деформации его элементов, лишая конструкцию жесткости на последующих стадиях эксплуатации. По этой причине изначальную податливость металлоконструкции, необходимую на этапе пуска, возможно задать конструктивным путем, предусмотрев создание зазоров между обечайкой кожуха и шпангоутами. Обеспечение необходимой жесткости для обжатия подины при установленном режиме работы электролизера должны выполнять шпангоуты каркаса. Иными словами, для электролизеров большой мощности, рассчитанных на силу тока 300 кА, целесообразно в качестве базовой рассматривать каркасно-шпангоутную модель катодного кожуха.

Иллюстрировать разницу в механизме работы цельносварного шпангоутного и каркасно-шпангоутного кожухов для электролизеров на силу тока 300 кА возможно расчетным путем.

Для того чтобы выделить наиболее существенный фактор в механизме работы металлоконструкции кожуха был использован следующий прием. В качестве

базовой модели металлоконструкции был принят каркасно-шпангоутный тип кожуха. Выполнялись расчеты его напряженно-деформированного состояния. Затем было принято условие жесткой связи, иначе говоря, сварного соединения, обечайки и шпангоутов каркаса. При таком условии, получается, по сути, цельносварная конструкция шпангоутного кожуха. Для этого случая также выполнялись расчеты напряженно-деформированного состояния.

Моделирование напряженно-деформированного состояния обоих типов кожухов проводилось с помощью пакета конечно-элементного анализа ANSYS [5]. При этом с целью более реалистичного воспроизведения нагрузок, приложенных к металлоконструкциям в установившемся режиме их работы, рассматривались катодные устройства в целом (при одном и том же виде футеровки, но с разными типами кожухов). В обоих случаях исследования проводились в рамках механической модели предложенной в работе [4]. Существенным моментом этой модели является учет контактных взаимодействий основных элементов катода, т.е. возможность взаимных смещений, как элементов футеровки, так и бортовой футеровки относительно обечайки, а также обечайки относительно каркаса. Температурные поля катодов рассчитывались путем решения несвязанных задач теплопроводности по методике, разработанной в работе [6].

Для сравнительного анализа прочностных характеристик катодных кожухов использовалась система оценочных параметров, введенная в статье [7] и апробированная в [8].

Численные расчеты показали определенные различия в деформациях кожухов рассматриваемых типов. Прежде всего, необходимо отметить существенную разницу в прогибах днища (рис. 1). Прогиб центра днища U_3 шпангоутного кожуха превышает аналогичную величину у каркасно-шпангоутного почти в 2 раза. Кроме того, максимальные прогибы продольных и торцевых стенок каркасно-шпангоутного кожуха несколько меньше чем у цельносварной конструкции (см. величины U_1 и U_2 в табл. 1).

Характерной особенностью напряженного состояния катодных кожухов является то обстоятельство, что металлоконструкции в условиях их эксплуатации работают за пределом упругости, т.е. испытывают пластические деформации. Распределения интенсивности напряжений в исследуемых металлоконструкциях приведены на рис. 2. На рисунке 2 видно, что уровень интенсивности напряжений в обширных областях (окрашенных серым цветом) продольной и торцевой стенок, а в случае цельносварной шпангоутной модели также и на шпангоутах, достигает предела текучести. Параметром, контролирующим долю областей, подверженных пластическому деформированию, по отношению ко всей площади поверхности кожуха, является мера пластичности конструкции μ_σ [7]. Сравнение этого параметра для кожухов рассматриваемых типов показывает, что мера пластичности шпангоутного кожуха более чем в 2,5 раза превышает эту величину для его каркасно-шпангоутного аналога. Это объясняется тем, что у шпангоутного кожуха в отличие от каркасно-шпангоутной конструкции в состоянии пла-

стического течения находятся не только значительные части продольных и торцевых стенок, но и сами шпангоуты.

Сопоставление результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния катодных кожухов представлено в таблице 1. Приведенные данные показывают, что, и другие прочностные параметры каркасно-шпангоутной модели оказываются более предпочтительными. Так, величина максимальной интенсивности пластических деформаций ϵ_{imax} у каркасно-шпангоутной конструкции несколько меньше, т.е. риск возникновения разрушения в этом случае ниже. Мера остаточных деформаций μ_{cs} каркасно-шпангоутного кожуха, определяющая долю областей металлоконструкции, имеющих после снятия нагрузки заметные искривления, по отношению ко всей площади ее поверхности и характеризующая пригодность кожуха к использованию в последующих кампаниях более чем на 2,5% меньше чем у цельносварного кожуха. Следует отметить, что шпангоуты каркаса у каркасно-шпангоутной модели в отличие от шпангоутов цельносварной шпангоутной модели не испытывают пластических деформаций, а работают в упругой области и, следовательно, в этом случае каркас кожуха может быть использован после капитального ремонта катодного устройства.

Таблица 1.

Тип катодного кожуха	U_1 мм	U_2 мм	U_3 мм	μ_{σ} , %	ϵ_{imax} , %	μ_{cs} , %
шпангоутный	28,7	27,4	34,6	44,3	5,4	8,8
каркасно-шпангоутный	27,8	22,1	17,4	17,3	5,1	6,1

Кроме определенных преимуществ каркасно-шпангоутный кожух имеет один существенный недостаток, присущий, по-видимому, всем конструкциям такого типа. Слабыми местами в прочностном отношении каркасно-шпангоутной металлоконструкции являются приторцевые области продольных стенок, в которых развиваются обширные зоны пластического течения с высоким уровнем интенсивности деформаций. На рис. 3 показано распределение зон пластичности в приторцевой зоне, отмеченных серым цветом, а также довольно существенные искривления силовых элементов кожуха, соответствующие коэффициенту увеличения деформаций равному 20. Отсюда вытекает, что одним из основных направлений конструкторской деятельности для каркасно-шпангоутных кожухов является усиление их приторцевых областей с целью улучшения в этих зонах прочностных характеристик металлоконструкций.

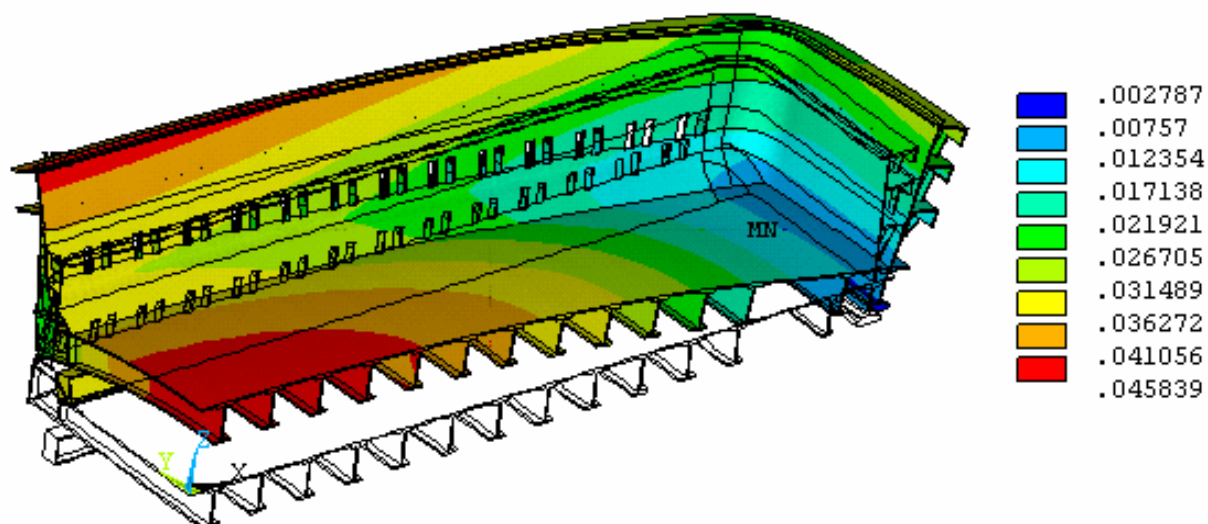
Представленные данные численного моделирования напряженно-деформированного состояния двух типов катодных кожухов, несмотря на отмеченный недостаток каркасно-шпангоутной конструкции (см. табл. 1), свидетельствуют в ее пользу. Все прочностные параметры каркасно-шпангоутного кожуха несколько лучше, чем у его цельносварного шпангоутного аналога.

Вывод.

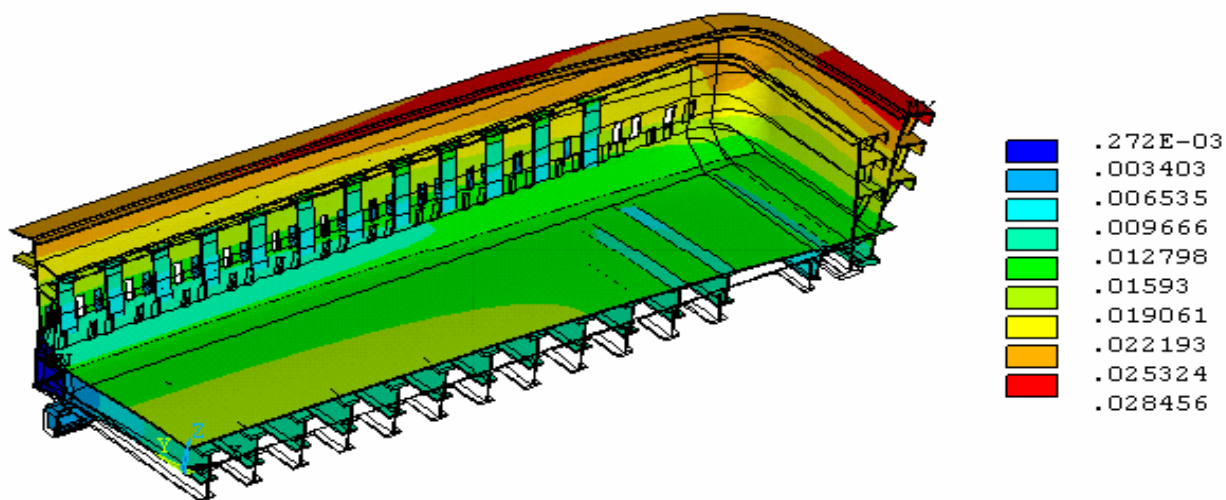
Для электролизеров с обожженными анодами на силу тока 300 кА в результате расчетов напряженно-деформированного состояния катодного устройства получено, что наиболее эффективным является применение каркасно-шпангоутного типа металлоконструкции кожуха.

Библиография.

1. РЕВЕРДИ М. Технология электролизеров AP30 (300 кА) и опыт работы, полученный после пуска новых серий электролиза на заводе в Сен Жан де Морьен. // *Light Metals*. 1995. p. 405-411.
2. С.Н.АХМЕДОВ, В.В.ТИХОМИРОВ, Б.С.ГРОМОВ, Р.В.ПАК, А.И.ОГУРЦОВ. Сравнительный анализ прочностных характеристик различных конструкций шпангоутных катодных кожухов. // *Цветные металлы*. 2003. №8-9. с.72-75.
3. П.И.ОРЛОВ. Основы конструирования. Справочно-методическое пособие. - М.: Машиностроение, 1988, - 560с.
4. С.Н.АХМЕДОВ, В.В.ТИХОМИРОВ, Б.С.ГРОМОВ, Р.В.ПАК, А.И.ОГУРЦОВ. Особенности деформации футеровки катодных устройств алюминиевых электролизеров. // *Цветные металлы*. 2004. №1. с. 48-51.
5. А.Б. КАПЛУН, Е.М.МОРОЗОВ, М.А.ОЛФЕРОВА. ANSYS в руках инженера. - М.:УРСС, 2003. -270с.
6. Б.С.ГРОМОВ, Е.Н.ПАНОВ, М.Ф.БОЖЕНКО и др. Обжиг и пуск алюминиевых электролизеров. - М.: Руда и металлы, 2001, - 336с.
7. В.В.ТИХОМИРОВ, С.Н.АХМЕДОВ, Б.С.ГРОМОВ, Р.В.ПАК, Ю.В.БОРИСОГЛЕБСКИЙ. Выбор параметров в прочностных расчетах катодных кожухов алюминиевых электролизеров. // *Цветные металлы*. 2003. №1. с.55-58.
8. В.В.ТИХОМИРОВ, С.Н.АХМЕДОВ, К.В. ЕЛИСЕЕВ, Б.С.ГРОМОВ, Р.В.ПАК, Ю.В. БОРИСОГЛЕБСКИЙ. Прочностные характеристики катодных кожухов шпангоутного типа алюминиевых электролизеров на различную силу тока. // *Цветные металлы*. 2003. №3. с.47-49.

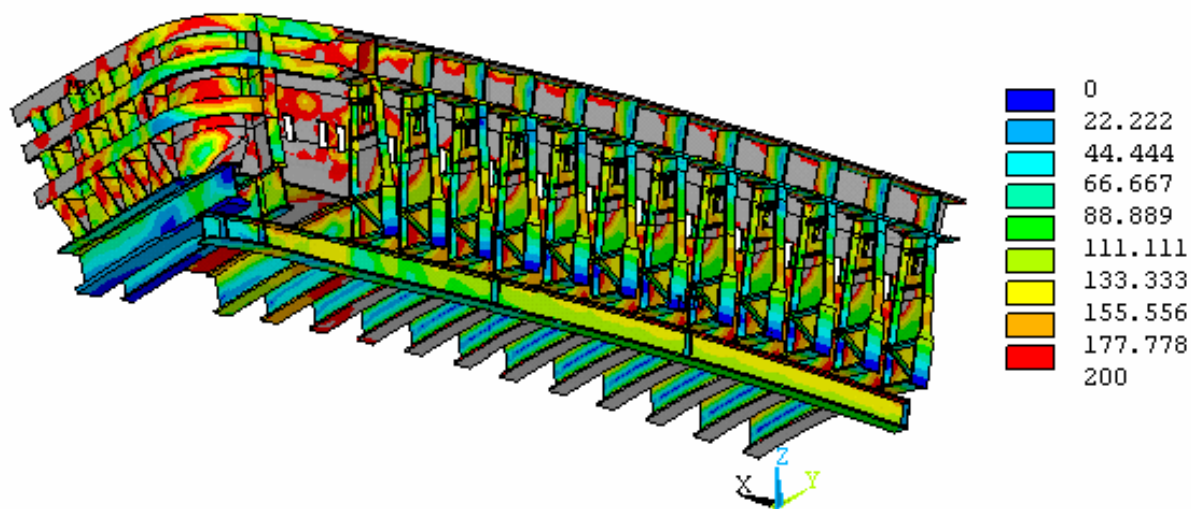


а

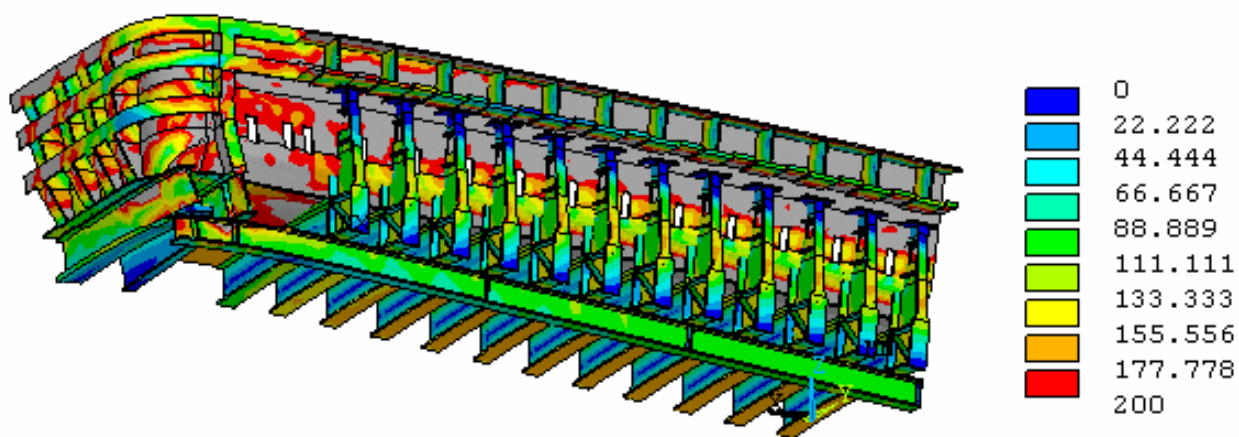


б

Рис. 1. Деформированное состояние шпангоутного (а) и каркасно-шпангоутного (б) кожухов в режиме эксплуатации.



а



б

Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений в шпангоутном (а) и каркасно-шпангоутном кожухах (б) в режиме эксплуатации.

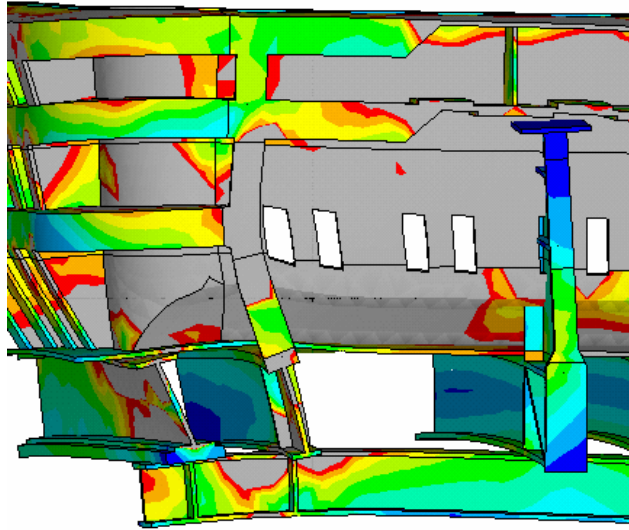


Рис. 3. Распределение интенсивности деформаций в торцевой части каркасно-шпангоутного кожуха в режиме эксплуатации (зоны пластической деформации отмечены серым цветом).