

УДК 621.874: 539.3

В.А. Лятуринский, ассистент,

М.В. Сидоренко, доцент, канд. техн. наук

Запорожский национальный технический университет

ул. Жуковского 64, г. Запорожье, Украина, 69063

E-mail: vasilyiat@gmail.com

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КОРОБЧАТОЙ КРАНОВОЙ БАЛКИ С УЧЁТОМ НАЛОЖЕНИЯ НЕСКОЛЬКИХ СВАРНЫХ ШВОВ

Проведено моделирование последовательного наложения сварного шва диафрагмы и поясного шва коробчатой балки. Сравнивались картины остаточных напряжений стенки для различных конфигураций балки. Предложены меры по снижению максимальных остаточных напряжений растяжения, а также пластических деформаций при остывании металлоконструкции.

Ключевые слова: кран, балка, сварка, напряжения.

Введение

Сварные балки коробчатого сечения на сегодня являются наиболее распространённым типом пролётных строений крановых металлоконструкций. Независимо от стран и компаний производителей кранов конструкции коробчатых балок практически неизменны. В расчётах данных балок наличие и расположение диафрагм не учитывается. Практика эксплуатации мостовых кранов показывает, что одним из характерных мест разрушений стенок главных и концевых балок являются зоны приварки диафрагм. Большинство существующих рекомендаций по форме, размерам и технологии приварки диафрагм получены эмпирическим путём и довольно расплывчаты.

Исследованием напряжённо-деформированного состояния (НДС) крановых металлоконструкций (МК) при эксплуатационных нагрузках занимались многие учёные. В большинстве случаев влияние технологии производства, а именно вызванных сваркой предварительных напряжений и пластических деформаций МК, никак не учитывается. Авторы [1 и др.] проводили исследования по определению деформаций и напряжений коробчатых балок (КБ) при наложении протяжённых поясных швов; также решена модель наложения короткого валика на полу-бесконечную пластину, призванная сымитировать приварку диафрагмы КБ. Суммарное воздействие от наложения двух швов ранее не рассматривалось. Из-за недостаточной исследованности вопроса, рекомендации по зазорам диафрагм, режимам и технологии сварки чрезмерно упрощены и продиктованы скорее упрощением технологии изготовления, а не повышением надёжности конструкции.

Постановка задачи

Целью данной работы является исследование взаимовлияния наложения поясного и вертикального шва стенки КБ на результирующее НДС стенки. Дополнительно будет рассмотрено влияние конструктивных и технологических различий на общую картину напряжений в зонах характерных разрушений стенки КБ, что позволит сформулировать научно-обоснованные рекомендации по приварке диафрагм.

1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа остаточных напряжений и деформаций при сварке сложных пространственных конструкций не существует аналитических методов. В исследовании будет использован числовой метод конечных элементов (МКЭ), получивший наибольшее распространение для решения подобных задач.

Размеры данной публикации не позволяют детально описать всю методику моделирования, остановимся лишь на характерных моментах и используемых упрощениях реальных физических процессов. Моделирование проводится в два этапа: термический и механический. Как было установлено в [2], для моделирования послесварочного НДС необходимо брать во внимание микроструктурные, термодинамические и механические процессы. На рисунке 1 представлена схема, показывающая содержание этапов моделирования, а также учитываемые в данном исследовании взаимосвязи между отдельными областями мультидисциплинарного исследования. Главным упрощением является отсутствие какого-либо анализа процессов в расплаве сварной ванны (рисунок 1), механические свойства стали после достижения температуры ликвидуса остаются постоянными. Данное упрощение допустимо т.к. гидродинамика расплава мало влияет на результирующее НДС узла. Единственным важным фактором остаётся геометрическая форма сварной ванны, которая должна обеспечиваться корректной моделью тепловложения.

Для моделирования тепловложения используется модель эллипсоидного источника тепла [3]. Рекомендации зарубежных авторов и собственные исследования авторов [2] указывают, что источник в форме двойного эллипсоида обеспечивает геометрию сварочной ванны, наиболее соответствующую возникающей при дуговой сварке плавящимся электродом.

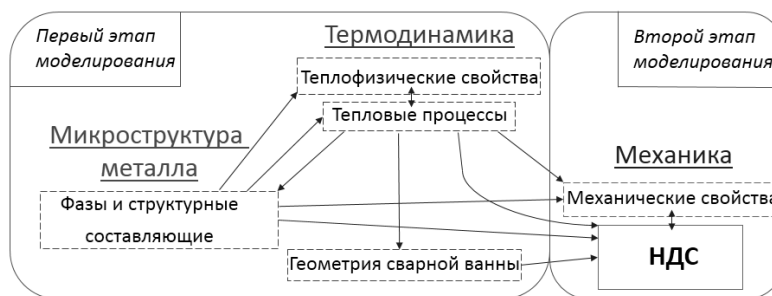


Рисунок 1 – Этапы моделирования и их взаимосвязи

Физические свойства стали задаются как функции температуры. Граничными условиями решения термической задачи являются классические уравнения конвекционного и радиационного теплообмена поверхности металла с воздухом. Для моделирования теплопроводности в объеме металла используется классическое уравнение теплопроводности Фурье. Также в уравнение теплового баланса внесена поправка на скрытую теплоту фазовых превращений $\alpha \leftrightarrow \gamma$ и теплоту плавления/кристаллизации.

На первом этапе моделирования дополнительно проводится расчёт концентрации фаз и структурных составляющих в каждый момент времени на основании диаграммы неизотермического превращения переохлаждённого аустенита. Необходимость учёта микроструктурного фактора обусловлена влиянием микроструктуры на теплофизические и механические свойства материала (рисунок 1). Поэтому в данной работе учитываются как диффузионные превращения (аустенитное, ферритно-перлитное, бейнитное), кинетика которых описывается уравнением Джонсона-Колмогорова, так и мартенситное, которое подчиняется закону Койстинена-Марбургера.

Механическая задача решается типично для МКЭ, с учётом истинной диаграммы растяжения, т.е. реального деформационного упрочнения. Нагружением на механическом этапе является термическое расширение/сжатие, а также изменения объёма, связанные с фазовым переходом. Механические и физические свойства каждого элементарного объёма материала определяются по результатам 1-го этапа моделирования в зависимости от термического цикла. Граничными условиями для решения задачи механики являются закрепления торцевых частей балки, показанные на рисунке 2, б.

Более детально используемая методика моделирования была описана авторами в [2], получаемые результаты хорошо коррелируют с результатами экспериментов, что было показано в [2].

2. МОДИФИКАЦИИ КОРОБЧАТОЙ БАЛКИ

Для исследования было создано несколько конфигураций трёхмерных КЭ моделей коробчатой балки (рисунок 2). Были получены картины НДС для каждого из расчётных случаев, сведенных в таблицу 1.

Таблица 1 – Рассчитываемые модели балки

| № модели | Поясной шов | Зазор L_1^* , мм | Окно L_2^* , мм | Связанность диафрагмы и верхнего пояса | Последовательность наложения швов (п – поясной шов, д – шов диафрагмы) | Время между наложением швов, с |
|----------|-------------|--------------------|-------------------|--|--|--------------------------------|
| 1 | нижний | 0 | 0 | + | д, п | 1300 |
| 2 | нижний | 12 | 10 | + | д, п | 1300 |
| 3 | нижний | 20 | 0 | + | д, п | 1300 |
| 4 | нижний | 35 | 10 | + | д, п | 1300 |
| 5 | нижний | 50 | 10 | + | д, п | 1300 |
| 6 | верхний | 10 | 0 | + | д, п | 1300 |
| 7 | верхний | 10 | 7 | + | д, п | 1300 |
| 8 | верхний | 10 | 20 | + | д, п | 1300 |
| 9 | верхний | 10 | 7 | - | п, д | 1300 |
| 10 | верхний | 10 | 7 | + | п, д | 1300 |
| 11 | верхний | 10 | 7 | - | д, п | 1300 |
| 12 | нижний | 20 | 10 | + | д, п | 0 |
| 13 | нижний | 20 | 10 | + | д, п | 250 |
| 14 | нижний | 20 | 10 | + | д, п | 600 |

* Размеры соответствуют рисунку 2, а

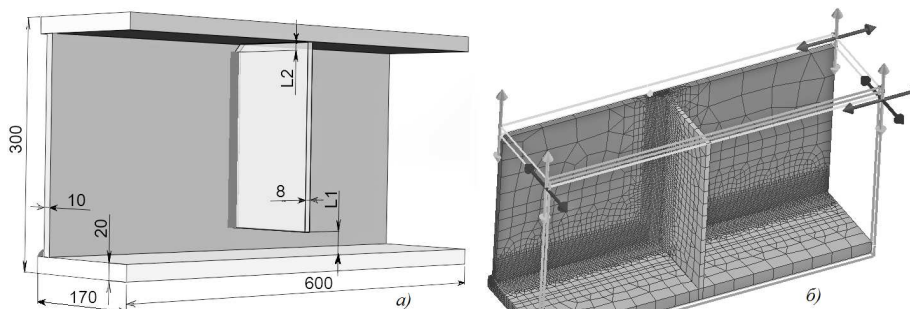


Рисунок 2 – Габариты модели КБ (а); КЭ представление КБ (б)

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 3 представлено распределение температурных полей при наложении поясного шва и шва диафрагмы. Размер и форма сварной ванны близки к реальным, что подтверждает удовлетворительную балансировку модели тепловложения [3]. Распределение теплового потока и полей температур не противоречит теоретическим предположениям. Следовательно, первый этап моделирования корректен и нагрузки для механической задачи верны.

Все указанные далее напряжения имеют место после полного остывания конструкции, для случая наложения обоих швов это 3500 секунда от начала сварки (где $t_{\max} = 32^\circ\text{C}$).

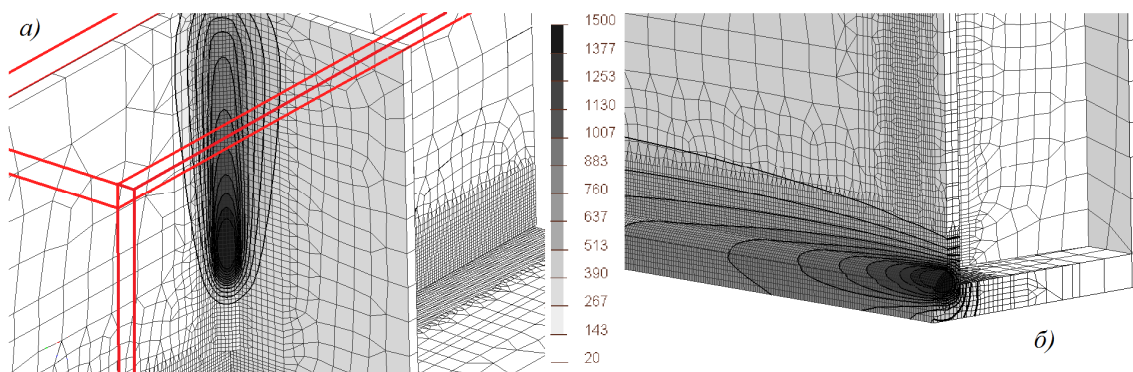


Рисунок 3 – Температурные поля при наложении швов коробчатой балки: а) наложение шва диафрагмы; б) наложение поясного шва

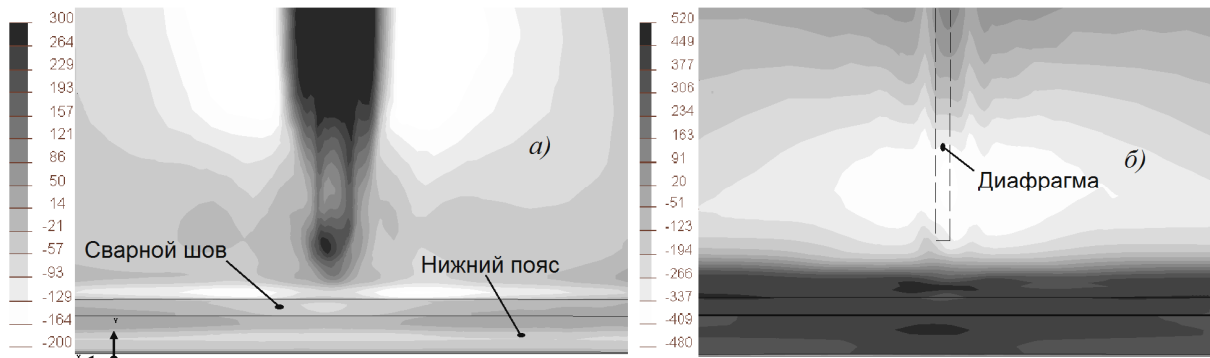
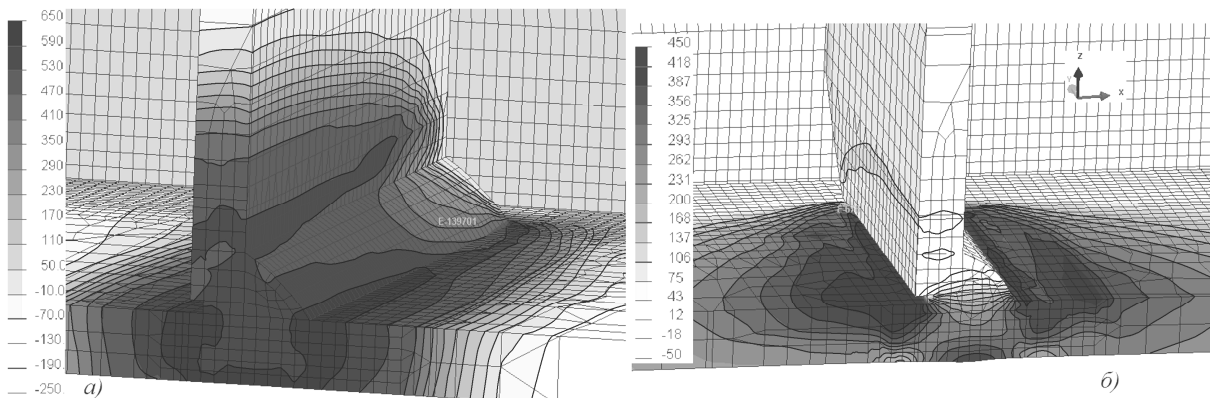
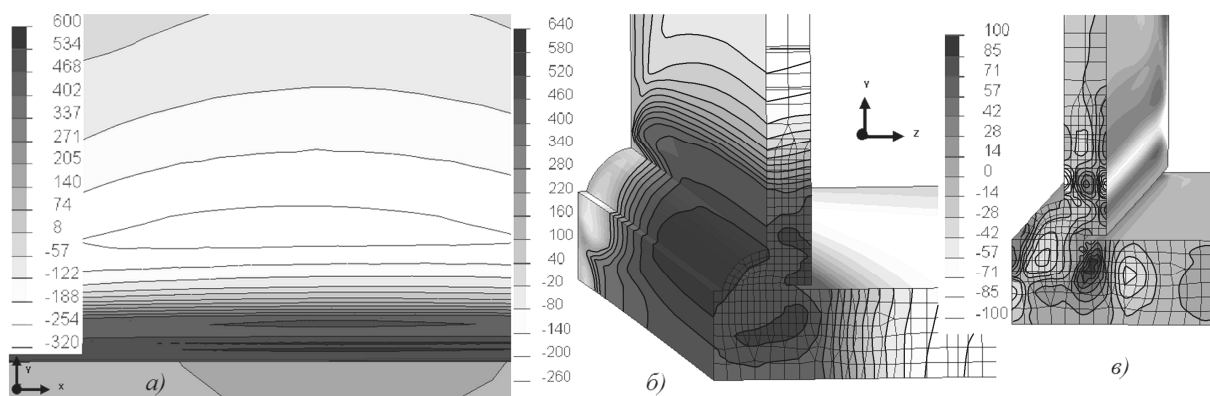
3.1. Наложение шва диафрагмы

Результаты моделирования показали, что наложение шва приварки диафрагмы вызывает высокие продольные ОН растяжения σ_{yy} (рисунок 4, а) на середине высоты стенки. Пики σ_{yy} находятся на лицевой поверхности стенки, около корня шва и в ЗТВ, на границе ОМ с наплавленным валиком вертикала (рисунок 5, а). В этих зонах металл находится в зоне текучести, σ_{yy} достигает 600 МПа. На нижнем и верхнем конце шва продольные напряжения значительно падают. Пики растягивающих ОН также наблюдаются в ЗТВ около торцевой части шва внутри стенки (σ_{yy} достигают 700 МПа). Максимальные σ_{yy} сжатия наблюдаются на удалении 60...70 мм от середины шва, достигают – 180 МПа. Вся ЗТВ вертикального шва и близлежащий к ней основной металл характеризуется высоким градиентом σ_{yy} .

У поперечных ОН σ_{xx} , вызванных приваркой диафрагмы, наблюдается значительный градиент по толщине стенки (рисунок 5, б). В направлении Y, при наличии обоих поясов, их поле однородно по всей длине шва, кроме крайних 35 мм, где видны краевые эффекты. Наиболее высоки σ_{xx} на внутренней поверхности стенки в 35 мм-й зоне в обе стороны от шва, пик находится на границе шва ($\sigma_{xx} \approx 500$ МПа). В приповерхностной зоне ЗТВ поле достаточно однородно и $\sigma_{xx} \approx 420$ МПа (рисунок 5, б). У торцов шва σ_{xx} падают, переходя в область ОН сжатия, что соответствует теории сварочных напряжений. Особенно большая зона ОН сжатия наблюдается на свободном краю стенки в типичном случае отсутствия одного из поясов. При наличии пояса отрицательные ОН переходят на него и σ_{xx} края стенки не так велики. Значения максимальных σ_{xx} сжатия зависят от конструктивных факторов, для модели 10 (таблица 1) достигают -530 МПа со свободного торца стенки, -350 МПа со стороны, связанной с поясом.

3.2. Наложение поясного шва

Ресурсоёмкость проводимого типа моделирования создаёт ограничения на габариты модели. Целью данного исследования не является детализация НДС, вызванного наложением поясных швов большой протяжённости. Длина поясного шва модели должна обеспечить характерное для этого случая напряжённое состояние стенки, что было достигнуто (рисунок 6).

Рисунок 4 – Поля напряжений стенки балки 4 после наложения 2-х швов, МПа: а) σ_{yy} ; б) σ_{xx} Рисунок 5 – Напряжения в сечении шва приварки диафрагмы: а) σ_{yy} ; б) σ_{xx} Рисунок 6 – Поля ОН для модели 10 перед приваркой диафрагмы: а) σ_{xx} внутренней поверхности стенки; б) σ_{xx} в сечении стенки; в) σ_{yy} в сечении стенки

На рисунке 6 показаны поля продольных σ_{xx} и поперечных σ_{yy} напряжений свободной стенки после остывания поясного шва, до приварки диафрагмы (модель 10, таблица 1). Видны характерные для протяжённых швов [1] высокие (до 510 МПа) продольные напряжения растяжения внутри и около шва, которые с удалением от шва быстро падают до напряжений сжатия (до -280 МПа). Поперечные напряжения σ_{yy} (рисунок 6, в) значительно ниже продольных, но характеризуются значительным градиентом по толщине стенки, что также было ранее замечено в [2]. Пики их наблюдаются на торцевых участках стенки, где наличествует резкий переход от значительного сжатия (ЗТВ поясного шва) до σ_{yy} растяжения (удалении 50 мм от шва).

3.3. Последовательное наложение швов

Взаимное влияние двух швов на НДС стенки КБ исследовалось для 14 различных конфигураций модели (таблица 1). Детальнее рассмотрим картины напряжений в интересующей нас зоне стенки, где близко расположены швы диафрагмы и пояса; оценим влияние конструктивных и технологических различий на НДС.

3.3.1. Влияние зазора между диафрагмой и нижним поясом

Приварка диафрагмы в отсутствии нижнего пояса приводит к значительным ОН σ_{xx} (вдоль поясного шва) сжатия в ЗТВ будущего поясного шва. Последующая приварка пояса смещает ОН сжатия за пределы своей ЗТВ. В результате, после остывания конструкции, внутри стенки имеем картину σ_{xx} , показанную на рисунке 7, а. В сравнении с типичным полем ОН (рисунок 6, а), наличие диафрагмы вызывает в 1,5 раза большие σ_{xx} сжатия за пределом ЗТВ поясного шва. Вне зависимости от зазора L1 (рисунок 2, а) пик σ_{xx} сжатия располагается на внутренней поверхности стенки, на расстоянии ≈ 60 мм от нижнего пояса. Зазор диафрагмы в 35 мм и 50 мм (модель 4, 5) мало повлиял на общее поле продольных ОН растяжения окрестности поясного шва (рисунок 7, б). Уменьшение зазора до 20 мм приводит к появлению нового пика растягивающих σ_{xx} в ЗТВ на удалении порядка 10 мм от края шва (рисунок 7, в). С дальнейшим уменьшением зазора пятно двигается к границе шва, максимальные σ_{xx} при этом увеличиваются, достигая 600 МПа для вар. 1 и 5 (против 320...370 МПа у вар. 4 и 3).

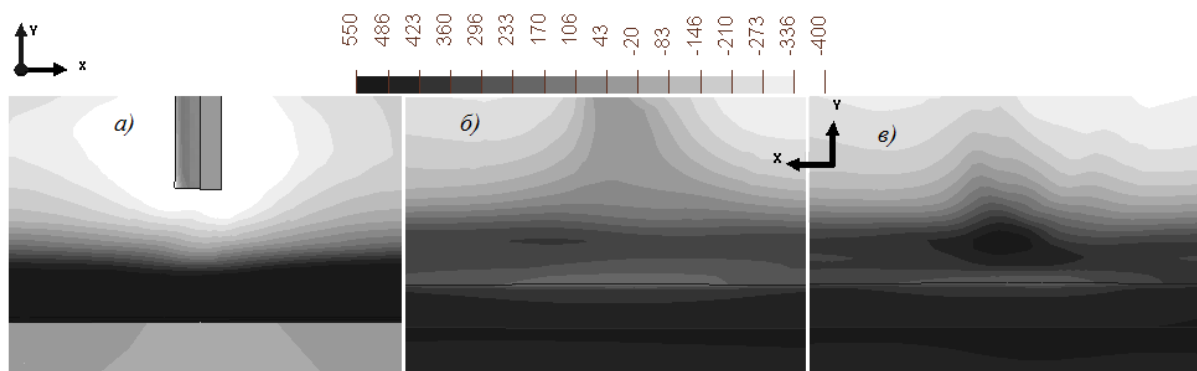


Рисунок 7 – Поля ОН σ_{xx} : а) внутренняя сторона стенки модели 5; б) наружная сторона стенки модели 5; в) наружная сторона стенки модели 3

Напряжения σ_{yy} стенки (вдоль диафрагмы) для вариантов с зазором 0–20 мм претерпевают заметных изменений только в окрестности конца шва диафрагмы, где появляется зона большого сжатия (порядка -200 МПа). Увеличение зазора диафрагмы приводит к тому, что при усадке на коротком участке стенки под диафрагмой достигается течение металла и ОН σ_{yy} в этой зоне растут. Наличие диафрагмы, добавляющее жесткости сечению балки, повышает градиент σ_{yy} по толщине стенки. В модели 5 амплитудные σ_{yy} наружной и внутренней поверхности стенки составили -300 и 270 МПа соответственно (граница поясного шва, под диафрагмой).

3.3.2. Влияние подрезки верхних углов диафрагмы

Для ОН стенки, влияние размера катета L2 (рисунок 2, а) идентично влиянию зазора под диафрагмой (см. п. 3.3.1). Пиковые ОН σ_{xx} лицевой части стенки достигают 480 и 600 МПа для L2 = 18 мм и L2 = 8 мм соответственно.

3.3.3. Влияние подварки диафрагмы к верхнему поясу

Максимальные ОН σ_{yy} растяжения практически не зависят от связанности диафрагмы и верхнего пояса. Поле же отрицательных σ_{yy} изменяется значительно. Передача верхним поясом деформаций на диафрагму, а не только на стенку, после остывания вызывает высокие σ_{yy} сжатия в диафрагме (≈ -300 МПа). При этом сжатие стенки КБ незначительно, составляет порядка -70 МПа против ≤ -200 МПа, наблюдаемых в той же зоне при наличии зазора. Градиент напряжений по толщине стенки и их пиковые значения в зоне окна диафрагмы уменьшаются при наличии связи.

ОН σ_{xx} , как и предполагалось, практически не зависят от подварки диафрагмы к верхнему поясу.

3.3.4. Влияние порядка наложения швов

На рисунке 8 приведено сравнение ОН для модели 10 и 7. Видно превалирующее влияние последнего из накладываемых сварных швов. Наложение последним шва диафрагмы (рисунок 8, а, в) значительно релаксирует высокие σ_{xx} растяжения, характерные для поясных швов. Дальнейшее остывание шва диафрагмы вызывает (характерные для швов диафрагмы) ОН σ_{xx} сжатия в верхнем поясе (рисунок 8, а). Стенка в зоне поясного шва при такой технологии изготовления менее напряжена в продольном направлении ($\sigma_{xx} \leq 240$ МПа на наружной поверхности стенки). При наложении последним поясного шва (рисунок 8, б, г), высокие ОН σ_{yy} вертикала релаксируются (рисунок 8, г) на достаточно большом участке стенки (≈ 40 мм – полная релаксация, ≤ 140 мм – частичная релаксация). После остывания наличие приваренной диафрагмы способствуют перераспределению усадочной нагрузки и σ_{yy} раньше переходят в область сжатия (рисунок 8, г).

3.3.5. Влияние временного интервала между наложением швов

В модели 12 поясной шов накладывался сразу после шва диафрагмы. Этот случай в сравнении с моделью 3 (рисунок 7, в) показал значительное влияние временного фактора. У ОН отсутствует характерный для моделей 2...4 пик σ_{xx} над поясным швом в зоне диафрагмы. Наоборот, в этой зоне в однородном поле высоких σ_{xx} растяжения появляется спад (рисунок 9, а), где однородные вдоль пояса σ_{xx} падают в 1,5 раза. Значительные изменения в ОН σ_{xx} также видны в окрестности конца вертикала – фактически отсутствует характерная (рисунок 7, а) зона высокого сжатия на внутренней поверхности стенки.

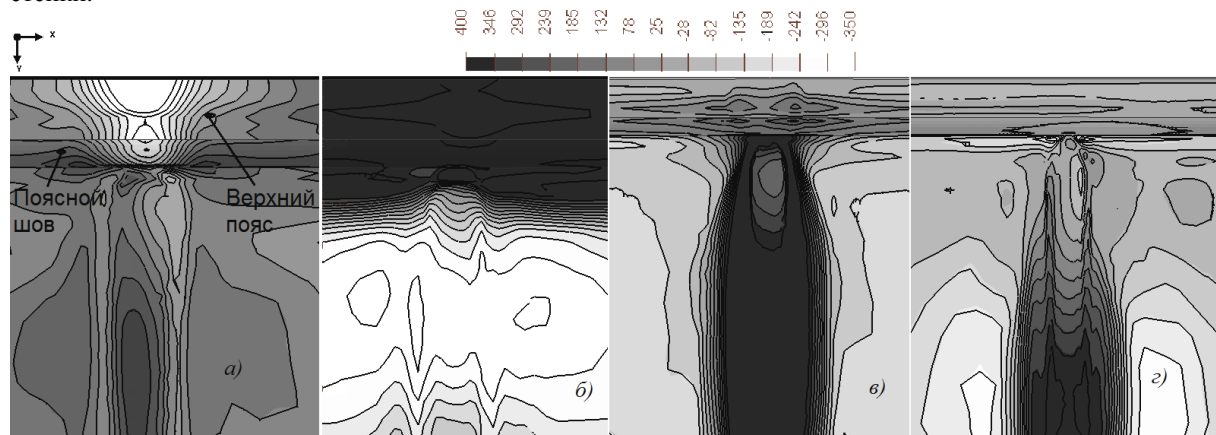


Рисунок 8 – ОН σ_{xx} модели 10 (а); ОН σ_{xx} модели 7 (б); ОН σ_{yy} модели 10 (в); ОН σ_{yy} модели 7 (г)

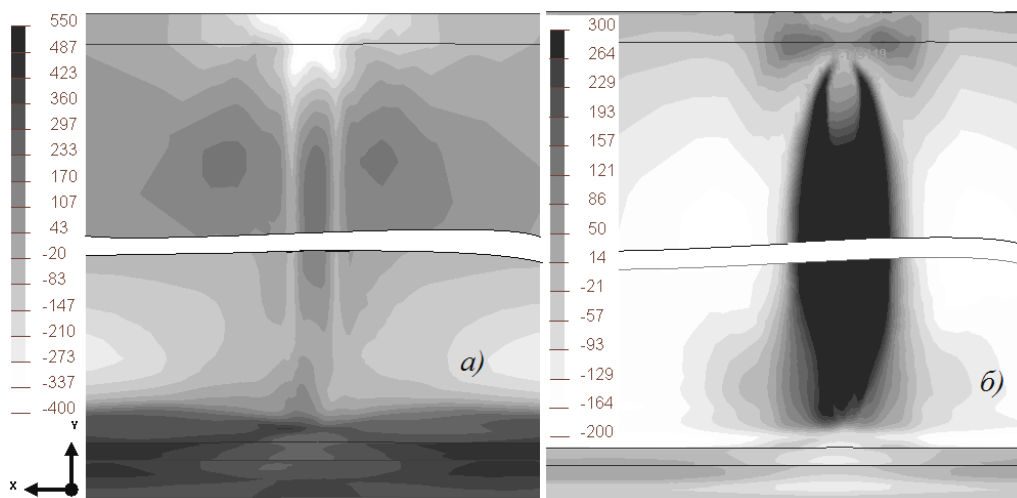


Рисунок 9 – ОН модели 12: а) σ_{xx} ; б) σ_{yy}

Общий характер распределения ОН σ_{yy} изменился мало. На $\approx 30\%$ повысились максимальные σ_{yy} в зоне нейтральной линии стенки, достигнув значений 540 МПа. Размер зоны σ_{yy} сжатия на удалении от диафрагмы увеличился, их переход на ЗТВ поясного шва более равномерен. У конца вертикала отсутствуют высокие ОН сжатия, эта зона характеризуется значительно меньшими градиентами σ_{yy} .

Замечено, что максимальное исчерпывание пластичности наблюдается в между торцом вертикала и поясным швом (зона 20×12 мм), где составляет $\geq 2,2\%$; для сравнения, аналогичная зона модели 3 исчерпала пластичность на $\geq 3\%$.

3.4. Пластические деформации

При решении данной задачи рассматривалось исчерпывание пластичности металла (α фазы). Было выявлено, что наибольшим пластическим деформациям при остывании подвержена локальная зона стенки между поясным швом и диафрагмой, размерами $\approx L1 \times 14$ мм. Максимальную текучесть в этой зоне испытала модель 3 ($\geq 3,4\%$), значительно меньшую – такие модели как 5 и 12 ($\geq 2,2\%$). Минимальную текучесть испытали модели с очень близким расположением швов диафрагмы и пояса (1, 2, 6, 7 и др.), причиной чего явилось перераспределение нагрузки со стенки на валики швов, однако общее поле ОН этих моделей неблагоприятно.

ВЫВОДЫ

В работе впервые детально анализировалось распределение ОН в стенке КБ при последовательном наложении вертикального шва приварки диафрагмы и поясного шва. Трёхмерная постановка задачи позволила получить развёрнутые картины ОН. Сравнение 14 конфигураций модели показало:

1. Величина зазора между диафрагмой и нижним поясом значительно влияет на ОН в локальной зоне стенки под диафрагмой. Здесь высоки неблагоприятные для этого участка продольные ОН растяжения. С точки зрения исчерпания пластичности и ориентации ОН критичными являются участки ЗТВ торца шва диафрагмы и ЗТВ поясного шва под диафрагмой, что совпадает и с характерными очагами трещин. Для подобных КБ можно рекомендовать зазор под диафрагмой не менее 35 мм.

2. Катет верхних подрезов диафрагмы влияет на ОН подобно нижнему зазору. Связанность диафрагмы с верхним поясом значительно разгружает стенку в вертикальном направлении. Во избежание чрезмерных напряжений и пластических деформаций катет L2 (рисунок 2) подобных КБ должен быть ≥ 18 мм.

3. Установлено превалирующее влияние последнего из накладываемых швов на общую картину ОН. Порядок наложения швов рекомендуется выбирать в зависимости от характера рабочего нагружения. Для крановых КБ можно рекомендовать наложение верхнего поясного шва последним.

4. Период остывания конструкции между последовательным наложением швов существенно влияет на картину ОН, а также на величину пластических деформаций. Установлено, что одновременное наложение поясного шва и шва диафрагмы способствует 2-х кратному снижению максимальных ОН и 1,5 кратному снижению уровня пластических деформаций в опасной зоне двух близкорасположенных швов стенки КБ. В целом, избегая двойных термических циклов, можно уменьшить как величину пиковых напряжений, так и их градиенты; также появляется возможность добиться более благоприятной ориентации ОН по отношению к рабочему нагружению.

Бibliографический список использованной литературы

1. Вершинский А.В. Технологичность и несущая способность крановых металлоконструкций / А.В. Вершинский. — М.: Машиностроение, 1984. — 167 с.

2. Лятуринский В.А. Моделирование послесварочного напряжённо-деформированного состояния коробчатых крановых балок с криволинейными швами / В.А. Лятуринский, М.В. Сидоренко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. — Запоріжжя, 2013. — № 2. — С. 130–138.

3. Goldak J. A new finite element model for welding heat sources / J. Goldak, A. Chakvanati, M. Birbby // Metallurgical transaction B. — June 1986. — Vol. 15b. — P. 299–305.

Поступила в редакцию 28.02.2014 г.

Лятуринський В.О., Сидоренко М.В. Технологічний напружений стан коробчастої кранової балки з урахуванням накладання декількох зварних швів

Проведено моделювання послідовного накладання зварного шва діафрагми та поясного шва коробчастої балки. Запропоновано заходи щодо зменшення максимальних залишкових напружень розтягу, а також пластичних деформацій при остиганні конструкції.

Ключові слова: кран, балка, зварювання, напруження.

Lyaturinskiy V.A., Sidorenko M.V. Technological stress state of crane box girder with due regard for superposition of several welds

Sequential welding of the diaphragm and longitudinal welding of box girder are modelled in the article. Residual stresses for different configurations of the beam are compared. The measures to reduce the maximum tensile residual stresses and plastic deformation during cooling of the metal construction are given.

Keywords: crane, beam, welding, stresses.