



## РАСЧЕТ ЛОКАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНАХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Чл.-кор. НАН Украины **В. И. КИРЬЯН, В. И. ДВОРЕЦКИЙ**, д-р техн. наук, **М. Г. МАЛЬГИН**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработан подход к расчету локальных напряжений в зонах сварных соединений конструкций, основанный на введении в расчетную модель абсолютно жестких тел (АЖТ) в виде плоских сечений. Согласно гипотезе плоских сечений АЖТ обеспечивает адекватную передачу внешних силовых воздействий от одной модели фрагмента к другой и позволяет исследовать локальное распределение напряжений в зоне сварных соединений с учетом пространственной работы всей конструкции, что дает качественно новый инструмент для учета эксплуатационной нагруженности элементов при оценке усталостной долговечности.

*Ключевые слова:* крупногабаритные пространственные конструкции, сварные соединения, локальное напряжение, метод конечных элементов, конечно-элементная модель, абсолютно жесткое тело, расчет

При определении уровня и повторяемости напряжений в сварных узлах весьма важно учитывать пространственную работу конструкции. Основным методом пространственного расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) узлов и элементов конструкций является метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет аппроксимировать любое деформируемое тело моделью, состоящей из определенного типа конечных элементов (КЭ). С математической точки зрения расчет сводится к решению систем уравнений равновесия, совместности деформаций и физических уравнений.

При расчетной оценке НДС сварных узлов необходимо адекватно отобразить характер взаимодействия элементов в зонах конструктивных концентраторов с геометрией сварных соединений. Поэтому необходимо аппроксимировать всю конструкцию трехмерными КЭ. Производить расчеты с такой подробной аппроксимацией всех узлов и элементов весьма сложно. Такие расчеты требуют применения мощной вычислительной техники и выполняются в исключительных случаях. В общепринятой инженерной практике расчет локальных напряжений в сварных узлах металлоконструкций промышленных зданий и инженерных сооружений связан с их расчленением на отдельные фрагменты и поэтапным рассмотрением НДС [1]. Вначале сварную конструкцию рассматривают как стержневую модель с заданными нагрузками и условиями закрепления. Затем из стержневой модели всей конструкции выделяют фрагмент с исследуемым сварным узлом и представ-

ляют его оболочечными КЭ. После расчета фрагмента из оболочечных КЭ выделяют сварной узел, который представляют трехмерными КЭ. Расчет последнего дает объемное распределение НДС каждого входящего в него конструктивного элемента. В таких случаях принципиальной и довольно непременной в реализации является необходимость установления при переходе от одной расчетной модели фрагмента к другой (с более сложной аппроксимацией) граничных условий в виде узловых связей и внешних силовых воздействий, полученных при расчете НДС предыдущего фрагмента. Сложность возрастает в случае работы конструкции при переменном нагружении, приводящем к изменению характера взаимодействия конструктивных элементов сварных узлов. Чтобы адекватно отразить влияние внешних переменных воздействий на НДС в анализируемых точках сварного узла при разных схемах нагружения, для каждой расчетной модели фрагмента требуется разрабатывать новые граничные условия. Это затрудняет расчет конструкций, анализ уровня и характера изменения напряжений в отдельных элементах сварного узла при одинаковых исходных положениях (назначения расчетных характеристик, расчетных нагрузок и критерия их сравнения).

Вместе с тем в расчетах строительных конструкций, в частности железобетонных, используется такой КЭ, как абсолютно жесткое тело (АЖТ), позволяющий создавать жесткую связь между моделями фрагментов, состоящих из разных типов КЭ [2, 3]. Его используют для передачи информации о НДС от одной части модели конструкции к другой. При этом в качестве АЖТ применяют один из конструктивных (связующих) элементов, в результате чего вся конструкция рассматривается в виде единой расчетной модели. Идея применения АЖТ в виде конструктивных элементов вполне удачна и хорошо отработана

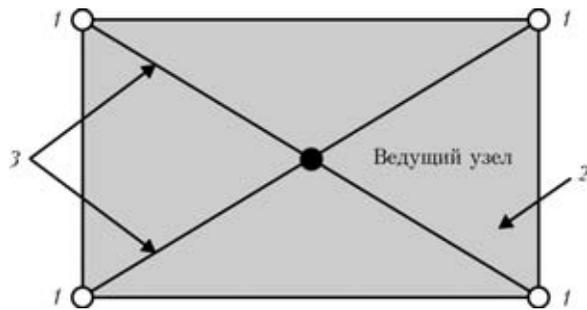


Рис. 1. Схема АЖТ: 1 — ведомый узел; 2 — АЖТ; 3 — жесткая связь между узлами (радиус-вектор)

при довольно простых формах сопряжения: объединение модели колонны промышленных зданий с моделью плиты перекрытия из пластинчатых КЭ; объединение стержневых моделей ребер балок мостовых конструкций с плитой проезжей части из пластинчатых КЭ и т. д. Однако при оценке НДС сварных узлов применять АЖТ в виде конструктивного элемента затруднительно, так как само сопряжение (сварной узел) подлежит исследованию.

Поскольку деформация напряженных элементов сварных конструкций вполне удовлетворительно подчиняется гипотезе плоских сечений, при каждом переходе от одной расчетной модели фрагмента к другой наиболее рационально вводить АЖТ не в виде конструктивного элемента, а как плоское АЖТ — сечение конструктивного элемента последующей модели. При соблюдении определенных условий взаимодействия АЖТ в виде плоского сечения с моделями фрагментов представляется возможным с использованием МКЭ производить расчеты локальных напряжений в сварных узлах конструкций любой сложности, адекватно передавая наследственную информацию о НДС от одной расчетной модели к другой с учетом особенностей нагружения. При использовании АЖТ в виде плоского сечения во взаимосвязи с гипотезой плоских сечений важно обеспечить выполнение двух основных условий: ведущие узлы предыдущей модели и ведомые узлы

последующей модели лежат в одной плоскости; взаимодействие ведущего узла с ведомым принимается таковым, при котором сохраняется закономерность поведения конструктивных элементов. При этом перемещения  $u_s$  и углы поворота  $\theta_s$  каждого ведомого узла связываются через радиус-вектор  $\rho_{m-s}$  (рис. 1) с перемещениями  $u_m$  и углами поворота  $\theta_m$  ведущего узла следующей зависимостью:

$$\begin{pmatrix} u_s \\ \theta_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_m + \theta_m \rho_{m-s} \\ \theta_m \end{pmatrix}$$

В данной работе предлагается методика расчета локальных напряжений в зонах сварных соединений крупногабаритных пространственных конструкций с использованием АЖТ. В рамках предлагаемой методики вводятся такие понятия, как фрагмент и узел конструкции. Фрагментом является любая часть конструкции, включающая узел. В качестве узла принимается та часть конструкции (фрагмента), в которой сказывается взаимовлияние конструктивных элементов на его НДС. Для анализа действительной работы исследуемого сварного узла с использованием стандартной библиотеки КЭ создается единая пространственная КЭ модель всей конструкции с заданной точностью аппроксимации принятых конструктивных форм. По этой модели с учетом пространственного взаимодействия конструктивных элементов исследуется НДС сварного узла на основе последовательного рассмотрения моделей с разными типами КЭ (рис. 2, А–В): стержневой конструкции; оболочечной фрагмента; трехмерной узла.

На первом этапе рассматривается стержневая модель, в которой несущие элементы конструкции аппроксимируются стержневыми КЭ с соответствующими жесткостными характеристиками. По результатам ее расчета определяются усилия во всех элементах. На втором этапе стержневые КЭ в исследуемых местах конструкции заменяются трехмерной моделью фрагмента.

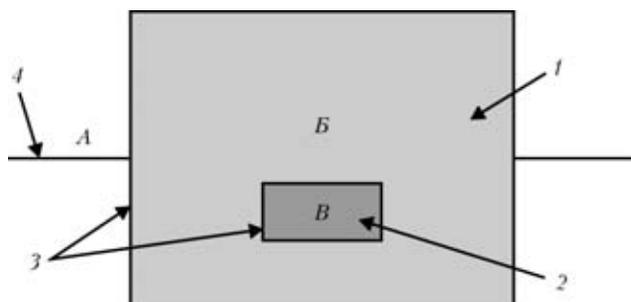


Рис. 2. Схема расчетной модели конструкции с АЖТ для расчета локальных напряжений в сварных узлах по предлагаемой методике: 1 — оболочечная модель фрагмента конструкции; 2 — трехмерная модель сварного узла; 3 — АЖТ; 4 — стержневая модель конструкции

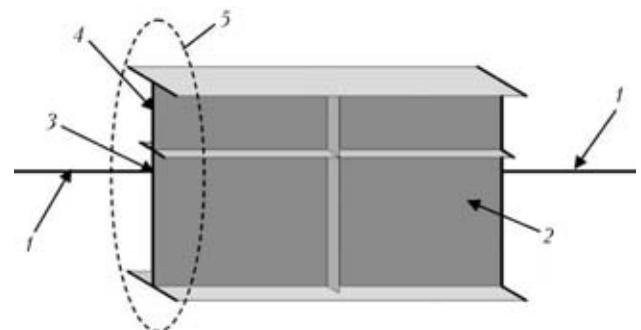


Рис. 3. Схема введения АЖТ между стержневой и оболочечной моделями: 1 — стержневые КЭ; 2 — оболочечная модель фрагмента конструкции; 3 — центр тяжести сечения; 4 — АЖТ; 5 — сечение конструктивного элемента оболочечной модели фрагмента

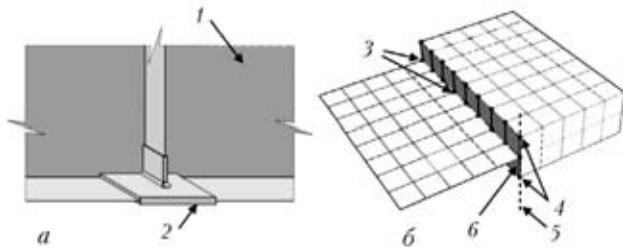


Рис. 4. Замена оболочечных КЭ трехмерной моделью (а) и введение АЖТ между оболочечными и трехмерными КЭ (б): 1 — оболочечная модель фрагмента конструкции; 2 — трехмерная модель узла; 3 — ведущие узлы; 4 — ведомые узлы; 5 — грань с ведущим и ведомыми им узлами; 6 — АЖТ

Для адекватной передачи мембранных и изгибных усилий через АЖТ от стержневой модели А к оболочечной модели фрагмента В (см. рис. 2) ведущий узел вводится стержневым КЭ и располагается в центре тяжести сечения прилегающего конструктивного элемента фрагмента с оболочечной аппроксимацией, а ведомые узлы — оболочечным КЭ (см. рис. 3).

На третьем этапе в местах исследуемого сварного узла В (см. рис. 2) оболочечные КЭ заменяются моделью узла с трехмерной КЭ аппроксимацией (рис. 4, а). Здесь передача мембранных и изгибных усилий через АЖТ от оболочечной модели фрагмента В к трехмерной модели сварного узла В (см. рис. 2) обеспечивается вследствие совпадения срединной поверхности оболочечных КЭ с нейтральной линией сечения трехмерной модели. Ведущие узлы задаются оболочечным КЭ, а ведомые — трехмерным КЭ. Ведущий и ведомые узлы принадлежат грани КЭ последующей модели (рис. 4, б).

Так, построенная расчетная модель конструкции с АЖТ обеспечивает адекватную передачу внешних силовых воздействий от фрагмента к фрагменту и дает возможность исследовать локальное распределение напряжений в зоне сварных соединений с учетом пространственной работы конструкции. Ее применение значительно упрощает анализ действительной работы сварных узлов конструкций с учетом взаимодействия входящих в него конструктивных элементов при воз-

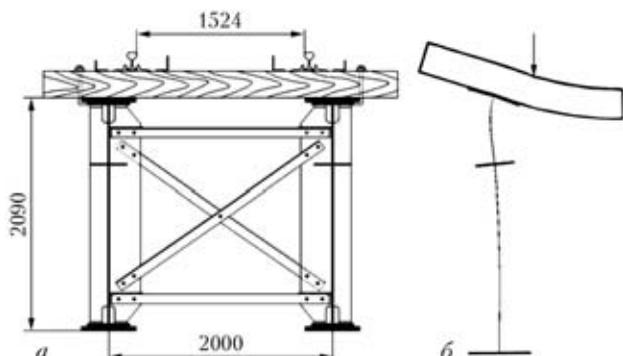


Рис. 5. Поперечное сечение сварного пролетного строения моста (а) и деформация его стенки из плоскости (б)

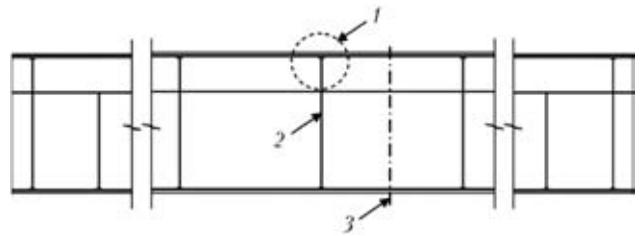


Рис. 6. Расположение исследуемого сварного узла: 1 — исследуемый сварной узел; 2 — поперечное ребро; 3 — середина пролета

действию переменной нагрузки, например обрабатывающейся. Тем самым методика дает качественно новый инструмент для анализа и учета эксплуатационной нагруженности сварных узлов при оценке усталостной долговечности конструкций, работающих в условиях переменных воздействий.

При эксплуатации пролетных строений мостов наиболее проблемными являются сварные узлы, подвергаемые непосредственному воздействию транспортных средств [4]. Их сопротивление усталости в значительной мере зависит от особенностей взаимодействия элементов с учетом приложения сосредоточенных нагрузок. Поэтому для обоснования и оценки эффективности предлагаемой методики выполнялся расчет НДС сварного узла типового цельносварного пролетного строения железнодорожного моста.

Пролетное строение состоит из двух сварных главных балок пролетом 27 м, объединенных в пространственную конструкцию системой продольных и поперечных связей (рис. 5, а). Высота главных балок составляет 2,09 м, расстояние между их осями — 2 м. Стенки балок подкреплены поперечными ребрами жесткости с шагом 2 м, а также продольными ребрами жесткости по всей длине пролета. Мостовое полотно расположено на деревянных поперечинах.

Важное влияние на формирование НДС пролетного строения оказывает прохождение каждой оси подвижной нагрузки, что в свою очередь вызывает изменение местного взаимодействия элементов. Помимо основного изгиба главных балок, возникает кручение верхнего пояса и деформация стенки из ее плоскости в отсеках (рис. 5, б), а также местный изгиб элементов в зоне попереч-

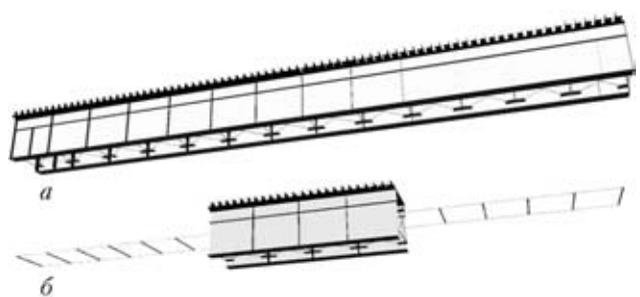


Рис. 7. Расчетные модели цельносварного пролетного строения (пояснения в тексте)

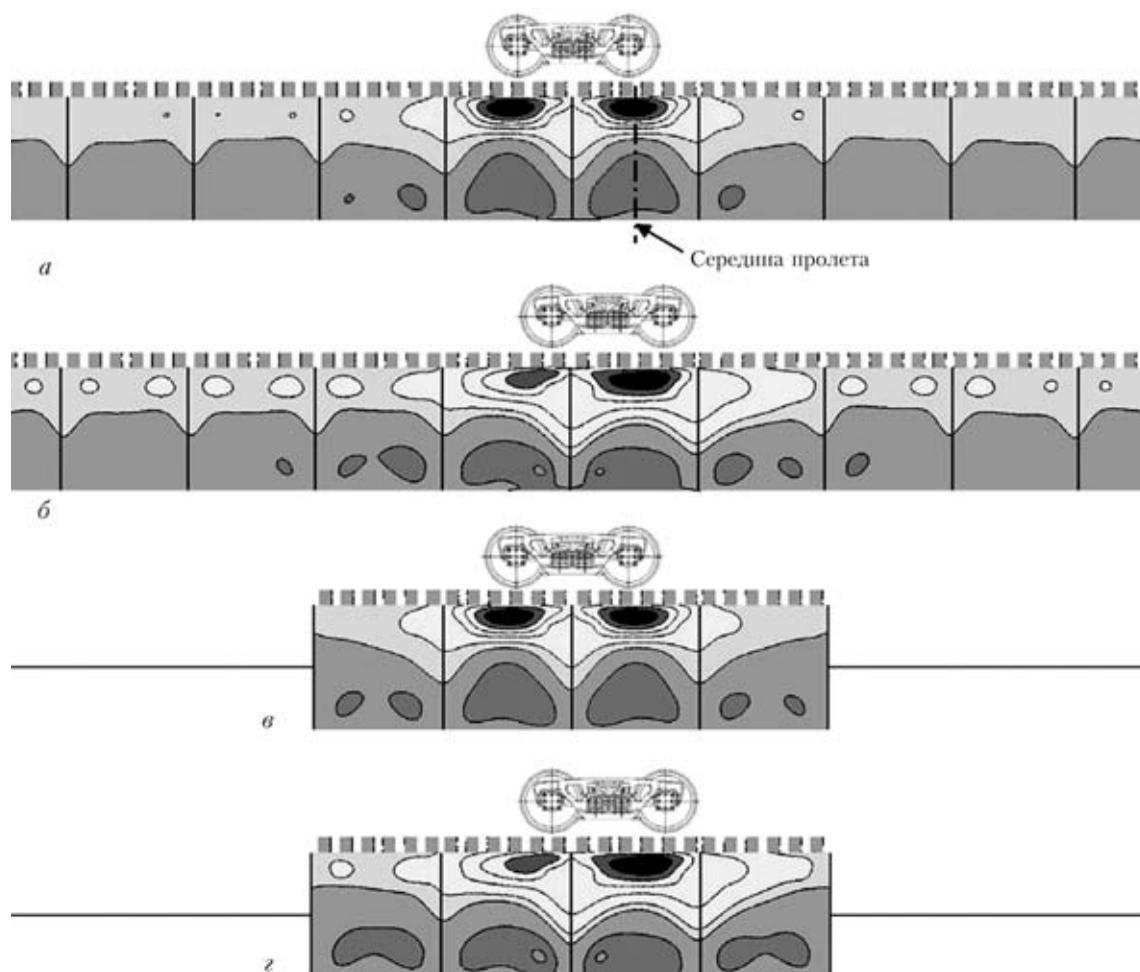


Рис. 8. Изополя поперечных перемещений вертикальной стенки в отсеках по первой (*а, б*) и второй (предлагаемой) модели (*в, г*)

ных ребер. Местное взаимодействие элементов существенно изменяется в зависимости от положения подвижной нагрузки. Поэтому при расчете на усталость сварных узлов необходимо учитывать особенности характера изменения, количества и повторяемости воспринимаемых переменных воздействий.

В качестве верификационного расчета для обоснования предложенных положений методики сопоставляли НДС элементов сварного узла приварки поперечных ребер в средней части пролета (рис. 6) по двум расчетным моделям с учетом различного положения тележки грузового вагона. Первая модель аппроксимировала несущие элементы конструкции оболочечными КЭ по всей длине пролета (см. рис. 7, *а*), а вторая составлялась по предлагаемой методике (см. рис. 7, *б*).

При анализе формирования НДС пролетного строения по результатам численного расчета первой модели отмечена выраженная зависимость характера взаимодействия элементов конструкции от положения подвижной нагрузки. Прохождение оси тележки над смежными отсеками существенно влияет на перераспределение НДС стенки. При симметричном положении тележки относительно поперечного ребра возникает симметричное де-

формирование стенки в отсеках, смежных с исследуемым сварным узлом (рис. 8, *а*). В верхних частях стенки образуются максимальные поперечные деформации одного знака, а в нижней — другого. Это соответствует S-образной форме поперечного изгиба стенки из плоскости. При этом элементы сварного узла имеют свой вполне определенный вид нагружения. С приближением оси тележки к поперечному ребру начинается перераспределение НДС, что приводит к асимметрии деформирования стенки (рис. 8, *б*). Нагруженность элементов узла изменяется. По результатам исследования закономерностей изменения НДС стенки в смежных отсеках при прохождении нагрузки установлено, что для отображения адекватной нагруженности сварного узла необходимо проанализировать фрагмент, включающий четыре отсека.

Сопоставление результатов расчета по первой и второй моделям (рис. 8) показало, что закономерности формирования НДС в рассматриваемых отсеках по характеру и уровню практически совпадают. На границах фрагмента НДС может несколько отличаться, вместе с тем это никак не сказывается на результатах анализа исследуемого узла. Таким образом, для определения действитель-

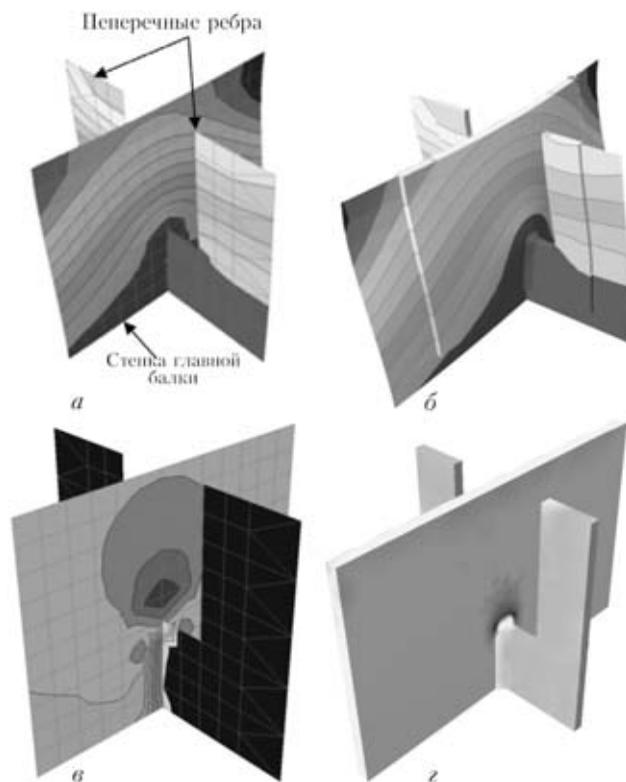


Рис. 9. НДС в зоне обрыва сварного шва, выполненного для прикрепления поперечного ребра к стенке пролетного строения: а, б — изополя поперечных перемещений элементов в оболочечной и трехмерной моделях; в, з — распределение местных напряжений на наружной поверхности стенки главной балки соответственно в оболочечной и трехмерной моделях

ной работы сварных узлов пролетных строений вполне достаточно выполнять детальную аппроксимацию лишь того фрагмента, в котором располагается исследуемый сварной узел.

Равнозначность оценки НДС стенки в исследуемых отсеках по обоим моделям позволила сделать сравнительный анализ формирования НДС в зоне обрыва сварного шва, выполненного для прикрепления поперечного ребра к стенке. По результатам расчета установлено, что трехмерная

модель имеет адекватную нагруженность через АЖТ в виде плоского сечения, о чем свидетельствует сходство перемещений (рис. 9, а, б). Вместе с тем характер распределения местных напряжений в моделях существенно отличается. Локальные напряжения в зоне сварного шва в трехмерной модели более полно отражают ее фактическое состояние (рис. 9, з). Поэтому при оценке эксплуатационной долговечности пролетных строений анализ характера изменения локального НДС сварных узлов по трехмерной модели предпочтительнее.

Таким образом, введение АЖТ в виде плоского сечения, связывающего в единой расчетной модели конструкции фрагменты из разнотипных КЭ, значительно упрощает анализ действительной работы сварных узлов с учетом пространственного взаимодействия входящих в него конструктивных элементов в условиях переменного нагружения. АЖТ во взаимосвязи с гипотезой плоских сечений обеспечивает адекватную передачу внешних силовых воздействий от одной модели фрагмента к другой и дает возможность исследовать локальное распределение напряжений в зоне сварных соединений с учетом пространственной работы всей конструкции. Это дает качественно новый инструмент для учета эксплуатационной нагруженности элементов при оценке усталостной долговечности металлоконструкций различного назначения.

1. *Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности* / В. А. Винокуров, С. А. Куркин, Г. А. Николаев / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1996. — 576 с.
2. *Городецкий А. С., Евзеров И. Д. Компьютерные модели конструкций*. — Киев: Факт, 2007. — 394 с.
3. *Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа*. — М.: ДМК Пресс, 2007. — 600 с.
4. *Лучко Й. Й., Сулим Г. Т., Кир'ян В. І. Механіка руйнування мостових конструкцій та методи прогнозування їх залишкової довговічності* / За ред. Й. Й. Лучка. — Львів: Каменяр, 2004. — Т. 6. — 883 с.

An approach to calculation of local stresses in zones of welded joints on structures has been developed. The approach is based on introducing absolutely rigid bodies (RB) in the form of plane sections into the calculation model. According to the plane sections hypothesis, RB provides an adequate transfer of the external force effects from one fragment model to the other, and permits the local distribution of stresses in the zones of the welded joints to be investigated by taking into account the spatial operation of the entire structure, thus providing a qualitatively new tool to allow for service loading of elements in evaluation of fatigue life.

Поступила в редакцию 14.12.2011