

ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Бандин О.Л.

*Доцент, старший научный сотрудник Московского государственного университета
природообустройства, кандидат технических наук*

Бондарович Л.А.

*Старший научный сотрудник кафедры «Испытания сооружений»
Московского государственного строительного университета,
профессор, кандидат технических наук*

Напряженно-деформированное состояние материала стальных конструкций в околошовных зонах характеризуется наличием остаточных сварочных напряжений неизвестного уровня, знака и ориентации главных деформаций.

Кроме того, в зонах сварных соединений изменяются прочностные характеристики конструкционных материалов и возникает концентрация напряжений в местах резкого изменения геометрии. Это затрудняет и даже делает невозможной оценку усталостной прочности таких конструкций современными численными методами. Только экспериментальным путем, тензорезисторным методом, можно оценивать напряженно-деформированное состояние и усталостную прочность сварных конструкций. Для выполнения такой оценки необходимо точное знание ориентации главных деформаций в зонах концентрации напряжений, чтобы грамотно осуществить тензометрирование и с большой точностью измерить фактический размах циклических деформаций.

Тензорезисторный метод измерения деформаций позволяет получать точную информацию о напряженном состоянии конструкций в том случае, когда оси тензорезисторов в исследуемой зоне совпадают с направлением главных деформаций. Если ось датчика отклоняется на некоторый угол, то его показания будут меньше истинной величины измеряемой деформации. При отклонении оси датчика от направления главной деформации на 60° его показания будут нулевыми (рис. 1).

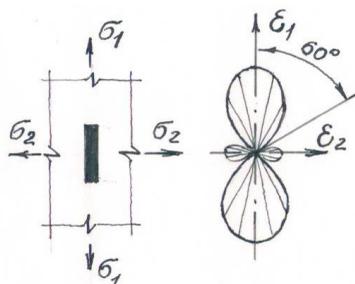


Рис. 1. Распределение деформаций, измеряемых тензорезисторами

Неточности в ориентации тензорезисторов при их установке на исследуемую конструкцию могут привести к существенным погрешностям измерений. Поэтому в тех случаях, когда направления главных деформаций в зонах концентрации неизвестны, их предварительно определяют либо методом хрупких покрытий, что значительно увеличивает длительность эксперимента, либо тензорезисторным методом с использованием прямоугольных или дельта-розеток, позволяющих определять величину и направление главных деформаций в зоне их наклейки (рис.2).

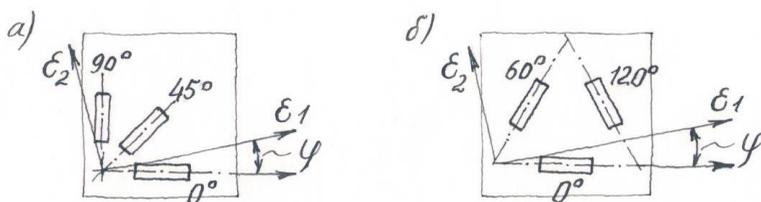


Рис. 2. Тензорозетки:

а – прямоугольная; б – дельта-розетка

Показания датчиков тензорозеток обрабатываются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \text{a) } \varepsilon_{1,2} &= \frac{\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_{90^\circ}}{2} \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{45^\circ})^2 + (\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{90^\circ})^2}; \\
 \operatorname{tg} 2\psi &= \frac{2\varepsilon_{45^\circ} - (\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_{90^\circ})}{\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{90^\circ}}; \\
 \text{б) } \varepsilon_{1,2} &= \frac{\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_{60^\circ} + \varepsilon_{120^\circ}}{3} \pm \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{60^\circ})^2 + (\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{120^\circ})^2 + (\varepsilon_{60^\circ} - \varepsilon_{120^\circ})^2}; \\
 \operatorname{tg} 2\psi &= \frac{\sqrt{3}(\varepsilon_{60^\circ} - \varepsilon_{120^\circ})}{2\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{60^\circ} - \varepsilon_{120^\circ}};
 \end{aligned}$$

В лаборатории кафедры испытания сооружений МГСУ были разработаны миниатюрные фольговые дельта-розетки (рис.3), которые позволили во многих экспериментальных работах [1, 2] получить уникальную достоверную информацию о напряженно-деформированном состоянии материала в зонах концентрации напряжений, где и возникают в процессе малоциклового нагружения, а потом развиваются усталостные трещины. В качестве примера можно привести натурный эксперимент, выполненный на канале имени Москвы в 80-е годы. После нескольких лет эксплуатации шлюзовых ворот канала имени Москвы были обнаружены трещины в околошовных зонах обшивки и в поясных уголках нижнего ригеля (рис. 4). Условия работы элементов конструкции шлюзовых ворот характеризуются цикличностью приложения нагрузок.

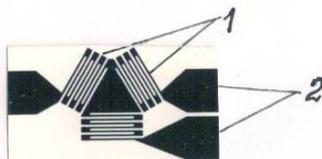


Рис.3. Дельта-розетка ТФР 0°/60°/120° с базой 1 мм и подложкой из плёнки клея БФ-4:

1 – тензорезисторы; 2 – токовыводные монтажные площадки

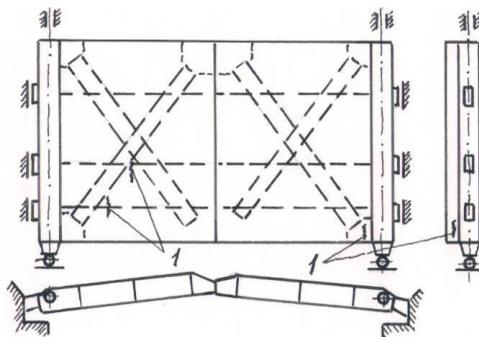


Рис. 4. Зоны обнаруженных разрушений шлюзовых ворот: 1 – трещины

Нагрузки за 1, 10 и 25 лет эксплуатации могут составлять соответственно 4000, 40000, 100000 циклов, что давало основание предполагать об усталостном происхождении обнаруженных разрушений в малоцикловой области. Как правило, малоцикловое разрушение связано с наличием пластической деформации материала в зонах концентрации напряжений. В связи с этим при оценке усталостной прочности существенным является исследование напряженно-деформированного состояния наиболее нагруженных элементов конструкции и изменения его с числом циклов нагружения. Из-за сложности конструкции шлюзовых ворот расчетное определение напряжений в названных выше элементах оказалось невозможным, так как давало лишь приближенные значения, в то время как для оценки работоспособности шлюзовых ворот необходимы были точные данные о размахе деформации материала в наиболее напряженных зонах и, в частности, в зонах сварных швов, прикрепляющих обшивку к нижнему ригелю.

С целью получения таких данных было проведено тензометрирование интересующих зон конструкции в натуральных условиях эксплуатации. Были использованы специальные малогабаритные фольговые тензорезисторы ТФРЦУ 0°/90° (рис.5) и ТФР 0°/60°/120°, надежно работающие как при статическом, так и при повторно-статическом нагружениях [3].

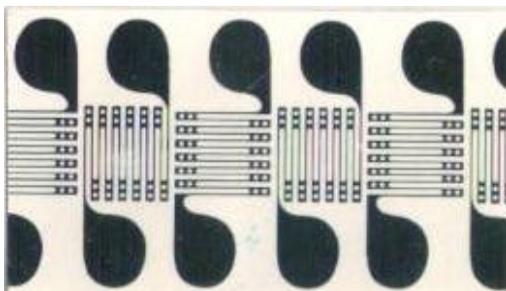


Рис.5. Цепочка ортогональных усталостных тензорезисторов с базой измерения 1 мм

Поскольку тензорезисторы должны были работать под водой в зоне движения льда (исследование проводилось в период начала навигации), защита датчиков от механических повреждений осуществлялась металлическими приклеиваемыми колпачками, а гидроизоляция выполнялась заливкой внутреннего пространства колпачка герметиком на основе эпоксидной смолы с пластификатором. Эти меры обеспечили работоспособность датчиков под водой в течение месяца. Показания тензорезисторов фиксировались аналоговым прибором АИД-4М при полностью опорожненной верхней камере шлюза, то есть при нулевой нагрузке ворот, а затем, в процессе заполнения водой верхней камеры, фиксировались показания тензорезисторов на трех уровнях нагружения ворот, включая момент максимального наполнения. Следующий замер снова проводился в момент полного опорожнения камер шлюза.

С целью набора статистических данных описанный цикл измерений повторялся многократно.

Эксперимент показал, что размах циклических деформаций в локальных зонах составлял 0,3-0,4%, что означало, что в зонах концентрации напряжений материал работает за пределами пропорциональности и что в этих зонах наблюдается малоцикловый характер нагружения.

Проведенное экспериментальное исследование НДС и оценка ресурса элементов ворот шлюза показали, что существующая конструкция и технология изготовления ворот не могут без промежуточных ремонтов обеспечить достаточно высокий ресурс по условиям сопротивления усталостному разрушению. Были выработаны рекомендации по увеличению сопротивления элементов шлюзовых ворот канала имени Москвы, которые позволяли повысить долговечность элементов ворот и увеличить период между ремонтами до 10-15 лет, что можно признать вполне удовлетворительным для практики эксплуатации такого оборудования.

Поскольку при анализе малоциклового усталости сварных конструкций необходима полная информация о напряженном состоянии мате-

риала в ее опасных зонах, нужно было решить проблему оценки уровня остаточных сварочных напряжений в этих зонах. В лаборатории кафедры испытания сооружений был опробован метод оценки остаточных сварочных напряжений путем освобождения от них столбика материала в локальной зоне с параллельной регистрацией деформации его поверхности малобазными фольговыми тензорезисторами (рис.6).

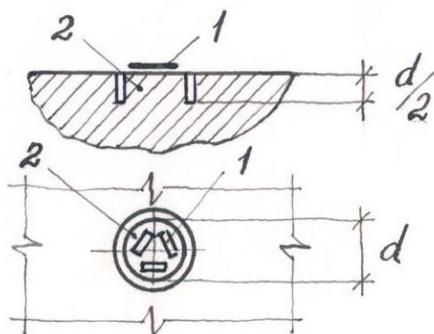


Рис.6. Метод оценки внутренних напряжений:
1 – тензорозетка; 2 – столбик материала

Надо отметить, что достоверность метода в значительной степени зависит от объема освобожденного материала. Как известно, остаточные напряжения в общем случае являются объемными напряжениями, когда источники этих напряжений размещены во всех точках объема тела. Поля этих напряжений уравновешены и, следовательно, вырезка некоторого объема материала освобождает этот объем только от действия на него остальной части тела. Часть же напряжений остается в освобожденном объеме и уравновешивается внутри него.

Таким образом, для определения истинной величины остаточных напряжений в локальной точке надо вырезать из объема тела только эту «точку».

В действительности приходится вырезать столбик материала, диаметр которого определяется габаритами размещенных на нем тензорезисторов, а высота должна быть не менее половины диаметра.

Миниатюрные дельта-розетки вписываются в круг диаметром 4 мм, так что для освобождения от остаточных напряжений поверхностного слоя материала высота вырезаемого столбика составляет всего 2 мм. Тот факт, что вырезается весьма малый объем материала, не только повышает достоверность измерений, но и почти не портит конструкцию, то есть делает возможным применение этого метода как практически неразрушающего.

Реализация вышеописанного метода снятия внутренних напряжений затрудняется необходимостью применения тонкостенных трубчатых фрез и необходимостью демонтажа-монтажа токовыводных проводников при поэтапной фиксации показаний тензорезисторов розетки. В дальнейшем было предложено другое решение проблемы – высверливание малого объема и разрыв цепочки внутренних напряжений в локальной зоне с параллельной фиксацией деформации материала в непосредственной близости от берегов отверстия (рис.7).

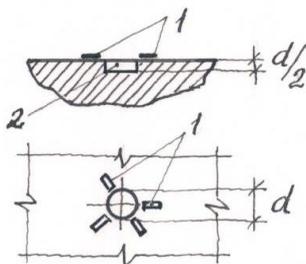


Рис. 7. Датчик остаточных сварочных напряжений (1) высверливаемый объем (2)

В этом случае тензорезисторы розетки размещаются на внешнем контуре отверстия и токовыводные проводники не мешают работе специальной фрезы, выбирающей материал исследуемой «точки».

При таком методе можно уменьшить диаметр выборки до 2 мм и таким образом уменьшить ее глубину до 1 мм. После оценки уровня остаточных сварочных напряжений в интересующих зонах и определения направлений главных деформаций можно начинать подготовку конструкции или ее фрагмента к исследованию усталостных явлений. Подготовка заключается в монтаже цепочек ортогональных малобазных розеток фольговых усталостных тензорезисторов с точной их ориентацией по направлениям главных деформаций, предварительном тензометрировании при малых уровнях нагружения с целью выявления зон с максимальной концентрацией напряжений, фиксации номеров тензорезисторов, находящихся в этих зонах, и построении эпюр распределения деформаций. После получения этой предварительной информации о напряженно-деформированном состоянии конструкции можно начинать экспериментальное исследование ее поведения в условиях циклического нагружения, используя тензорезисторы, находящиеся в зонах наивысшей концентрации деформаций уже в качестве датчиков повреждения [3].

В последнее время наблюдаются увлечение численными методами исследования НДС инженерных конструкций и незаслуженное забвение

ние экспериментальных методов и, в частности, тензометрического, возможности которого еще далеко не исчерпаны и который необходимо и дальше развивать и совершенствовать. Этот метод имеет большие перспективы и ждет своего широкого применения при исследованиях действительной работы инженерных сооружений в сложных условиях эксплуатации, особенно тогда, когда численные методы не могут дать объективной информации.

Библиографический список

1. Оценка уровня напряженности элементов шлюзовых ворот канала имени Москвы / В.Г. Абросимов, О.Л. Бандин, А.П. Гусенков, В.П. Когаев // Гидротехническое строительство. – М., 1982. №12.
2. Оценка долговечности при циклическом нагружении элементов ворот шлюзов канала имени Москвы / В.Г. Абросимов, О.Л. Бандин, А.П. Гусенков, В.П. Когаев // Гидротехническое строительство. – М., 1983. №11.
3. Бандин О.Л., Бондарович Л.А. Датчики усталостного повреждения. Проблемы реального использования // Современные методы инженерных изысканий в строительстве. – М.: МГСУ, 2003.