

## ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СВАРНЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ АТС

Д-р техн. наук М.С. ВЫСОЦКИЙ, А.В. ШМЕЛЕВ,  
Д.Н. СИДОРЕНКО

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси  
(+ 375 17. 210-07-49), МАЗ (+ 375 29. 686-53-64)

*Предложен расчетно-экспериментальный — гибридный подход к оценке усталостной долговечности несущих конструкций АТС, ресурс которых лимитируется прочностью сварных соединений. Уточнение полученных экспериментальным путем значений напряжений выполняется с использованием расчетных значений относительного градиента напряжений, вычисленного с применением метода конечных элементов.*

**Ключевые слова:** автомобиль, несущая конструкция, сварной шов, электротензометрия, расчет напряжений, расчет усталостной долговечности.

**Vysotski M.S., Shmeliov A.V., Sidorenko D.N.**  
**HYBRID APPROACH FOR FATIGUE DURABILITY ESTIMATION  
OF WELDED LOAD CARRYING AUTOMOTIVE STRUCTURES**

*Experiment-calculated — hybrid approach for fatigue durability estimation of load carrying automobile structures, containing lifetime limiting welded connections is introduced. Calculation of relative stress gradient used for a more precise definition of experimentally derived stresses is performed using final element method.*

**Keywords:** automobile, load carrying structure, seam weld, electrotensometry, stress calculation, fatigue durability estimation.

От параметров прочности и долговечности сварных соединений зависит работоспособность таких ответственных конструкций, как рамы, картеры мостов, балки осей и т. д., всей автомобильной техники, начиная от прицепов, полуприцепов и автомобилей малой грузоподъемности, заканчивая карьерными самосвалами БелАЗ. Важность правильного определения этих параметров обусловлена еще и тем, что они оказывают определяющее влияние на надежность всего АТС: имеющие место в эксплуатации отказы часто вызваны именно усталостными разрушениями сварных соединений конструктивных элементов.

Расчетный анализ прочности деталей и конструкций машин с применением численных методов, получивших широкое распространение на машиностроительных предприятиях, дает только косвенную информацию о работоспособности конструкций. Поэтому важным является интерпретация результатов таких расчетов для последующей оценки усталостной долговечности. Это особенно касается сварных соединений, которые, как известно, имеют довольно сложное напряженно-деформированное состояние (НДС) в зоне сварки. Для предотвращения разрушений сделано много. Однако они все-таки происходят. Это говорит о том, что к проектированию сварных соединений нужны новые подходы. И современный уровень научных знаний дает такую возможность.

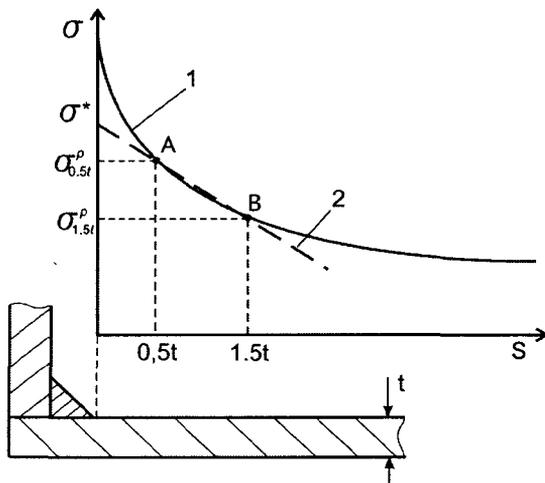


Рис. 1. Зависимость изменения напряжений у основания сварного шва  $f(\sigma)$ :

1 — нормальные напряжения; 2 — вспомогательная прямая

Сказать, что методик расчета усталости сварных соединений на стадии их проектирования нет, было бы неправильным: они есть. Более того, существует наиболее детальный подход, содержащий и руководящие документы по данной проблеме. В одном из них [1], приведены не только кривые усталости для различных типов сварных соединений, но и требования к детализации конечно-элементной сетки расчетной модели. Причем опыт применения этого документа на практике показал, что полученные на его основе результаты вполне удовлетворительно сопоставимы с экспериментальными данными. Поэтому авторы статьи на основе информации, содержащейся в нем, предложили расчетно-экспериментальный (гибридный) метод оценки усталостной долговечности сварных соединений элементов машиностроительных конструкций.

Вначале коротко о сути метода, приведенного в документе [1].

Согласно этому документу, нормальные напряжения  $\sigma^*$ , возникающие в наиболее нагруженной зоне сварного соединения конструкции, определяются по результатам расчета ее НДС с применением метода конечных элементов. Для этого по конечно-элементной модели конструкции, в районе наиболее нагруженной зоны ее сварного шва, определяются значения нормальных напряжений  $\sigma_{0,5t}^p$  и  $\sigma_{1,5t}^p$  (рис. 1). Они берутся на расстоянии 0,5 и 1,5 толщины  $t$  [2] свариваемого элемента конструкции от основания сварного шва. (Такой отступ необходим для того, чтобы снизить влияние высокого градиента напряжений в зоне их концентрации.) Через полученные таким образом на кривой две (A и B) точки проводится прямая до ее пересечения с осью ординат. Эта точка и дает искомое значение нормального напряжения  $\sigma^*$ .

Однако легко заметить, что в математической записи такая процедура имеет вид формулы № 1 (табл. 1).

С другой стороны, для расчета усталостной долговечности необходимо знать размах  $\Delta\sigma$  нормальных напряжений, характеризующий исследуемый режим нагружения. Его дает формула № 2. Значение  $\Delta\sigma$  позво-

ляет по уравнению кривой усталости, приведенному в документе [1], рассчитать число циклов  $N$  до разрушения, так как эта кривая уже учитывает концентрацию напряжений в сварном соединении.

Предлагаемый подход, в отличие от описанного, позволяет получить значение  $\Delta\sigma$ , учитывающее требование документа [1], по результатам эксперимента и приступить к расчетам долговечности по кривым усталости, приведенным в этом же документе.

Он основывается на допущении, что нелинейность градиента изменения напряжений на расстоянии  $0,5t$

Таблица 1

№ формулы	Формула	Примечания
1	$\sigma^* = 1,5\sigma_{0,5t}^p - 0,5\sigma_{1,5t}^p$	—
2	$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$	$\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ — максимальное и минимальное значения нормальных напряжений, вычисленные по формуле № 1
3	$\bar{\sigma}^3 = \frac{1}{\sigma_{0,5t}^3 - \sigma_{1,5t}^3} \int_{\sigma_{1,5t}^3}^{\sigma_{0,5t}^3} f(\sigma) dS$	$\sigma_{0,5t}^3$ и $\sigma_{1,5t}^3$ — максимальное и минимальное значения нормальных напряжений у начала и конца измерительной решетки тензорезистора (то же, что и $\sigma_{0,5t}^p$ и $\sigma_{1,5t}^p$ на рис. 1); $S$ — расстояние от основного сварного шва
4	$\bar{\sigma}^p = \frac{\sigma_{0,5t}^p + \sigma_{1,5t}^p}{2}$	—
5	$\bar{\sigma}^3 \approx \frac{\sigma_{0,5t}^3 + \sigma_{1,5t}^3}{2}$	—
6	$\bar{G} = \frac{\sigma_{0,5t}^p + \sigma_{1,5t}^p}{t\sigma_{0,5t}^p}$	—
7	$\begin{cases} \sigma_{0,5t}^3 + \sigma_{1,5t}^3 = 2\bar{\sigma}^3 \\ \sigma_{0,5t}^3 = \sigma_{1,5t}^3(1 - \bar{G}t) \end{cases}$	—
8	$\begin{aligned} \sigma_{0,5t}^3 &= \bar{\sigma}^3 \frac{1}{1 - 0,5\bar{G}t}; \\ \sigma_{1,5t}^3 &= \bar{\sigma}^3 \frac{1 - \bar{G}t}{1 - 0,5\bar{G}t} \end{aligned}$	—
9	$\sigma^* = \bar{\sigma}^3 \frac{1 + 0,5\bar{G}t}{1 - 0,5\bar{G}t}$	—
10	$\begin{aligned} \sigma^* &= \sigma_{\max}^3 + (\sigma_{\max}^3 - \sigma_{\min}^3) \frac{S_{\text{тенз}}}{l_{\text{тенз}}} = \\ &= \bar{\sigma}^3 \frac{(1 + \bar{G}S_{\text{тенз}})}{(1 - 0,5\bar{G}l_{\text{тенз}})} \end{aligned}$	$S_{\text{тенз}}$ — расстояние от основного шва до начала измерительной решетки тензорезистора; $l_{\text{тенз}}$ — база тензорезистора

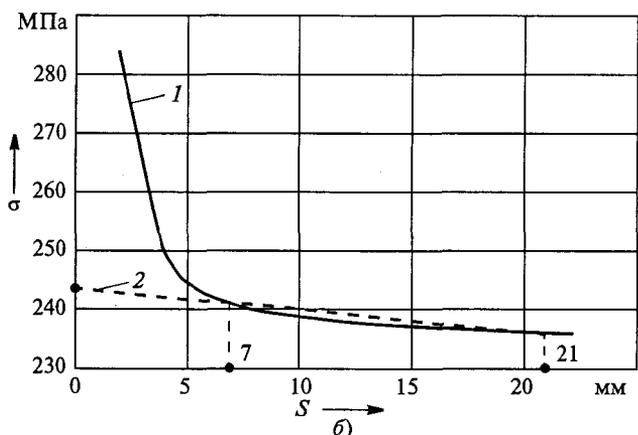
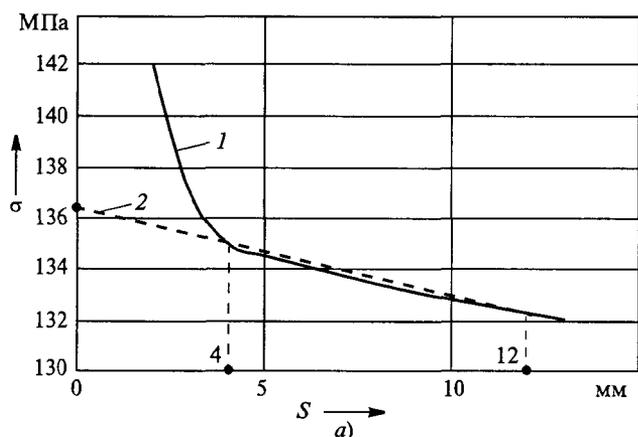


Рис. 2. Графики изменения нормальных напряжений у основания углового сварного шва, соединяющего две плоские пластины (а) и плоскую пластину с трубой (б):

1 — нормальные напряжения; 2 — вспомогательная прямая

и  $1,5t$  от основания сварного шва незначительна. Это допущение необходимо по следующей причине. При электротензометрии локальной зоны конструкции тензорезистор для функции  $f(\sigma)$  дает интегральную оценку среднего напряжения  $\bar{\sigma}^3$  (кривая 1 на рис. 1). Учитывая то, что установка и размер базы тензорезистора соответствуют расчетной схеме рис. 1, значение  $\bar{\sigma}^3$  может быть определено по формуле № 3. Это с одной стороны. С другой же, среднее расчетное нормальное напряжение на интервале от  $\sigma_{0,5t}^p$  до  $\sigma_{1,5t}^p$  должно вычисляться, согласно расчетному подходу, изложенному в документе [1] по формуле № 4. Поэтому сделанное допущение в математической записи принимает вид формулы № 5.

Справедливость принятого допущения следует из того, что на расстоянии более половины толщины свариваемого элемента конструкции от основания сварного шва изменение напряжений принимает практически линейный вид, о чем свидетельствуют расчеты, результаты которых для двух вариантов углового сварного соединения (плоские пластины толщиной 8 мм и такая же пластина с трубой, толщина стенки которой тоже равна 8 мм) приведены на рис. 2, а и б.

Задача расчета их НДС решалась в программном комплексе ANSYS конечно-элементного анализа.

Для этого были разработаны достаточно детальные конечно-элементные модели исследуемых соединений. В первом случае размер грани элемента в направлении нормальных напряжений был равен 1 мм, во втором — 2 мм. Относительная погрешность вычисления значения среднего напряжения  $\bar{\sigma}^3$  по формулам № 3 и 5 не превысила 1 %.

Для определения величин  $\sigma_{0,5t}^3$  и  $\sigma_{1,5t}^3$  необходимо ввести независимую характеристику темпа изменения напряжений у основания сварного шва. Но так как вспомогательная линия 2 (см. рис. 1) — прямая, то в качестве такой характеристики можно использовать относительный градиент  $\bar{G}$  напряжений [2], который дает формула № 6. Формулы № 5 и 6 образуют систему уравнений с двумя неизвестными (формулы № 7), из которой и находятся  $\sigma_{0,5t}^3$  и  $\sigma_{1,5t}^3$  (формула № 8). И, наконец, подставляя формулы № 8 в № 1, получаем формулу № 9.

Значение  $\sigma^*$ , вычисленное по этой формуле, так же как и в предыдущем случае, используется для расчета экстремумов  $\sigma_{\max}^*$  и  $\sigma_{\min}^*$  цикла нагружения, по которым затем определяется размах  $\Delta\sigma$ , необходимый для определения усталостной долговечности по кривым усталости.

Если длина ( $l_{\text{тенз}}$ ) базы тензорезистора меньше толщины свариваемого элемента конструкции, а сам резистор расположен в диапазоне  $0,5t - 1,5t$  (см. рис. 1), то искомое значение напряжения  $\sigma^*$  может быть найдено по формуле № 10. Она представляет собой наиболее общий расчетный случай и соответствует выражению в формуле № 9 с параметрами  $S_{\text{тенз}} = 0,5t$  и  $l_{\text{тенз}} = t$ .

В качестве примера применения гибридного подхода рассмотрим расчет усталостной долговечности оси прицепа со штампованными опорами (далее оси в сборе) для режима нагружения, соответствующего стендовым ускоренным испытаниям, конечно-элементная модель которой приведена на рис. 3.

Для определения НДС у наиболее нагруженного сварного шва оси была разработана детальная подмодель рассматриваемой зоны конструкции (рис. 4). Ее нагружение осуществлялось аппроксимацией перемещений узлов конечно-элементной модели всей конструкции на узлы подмодели, принадлежащие поверхности "вырезки" ее из основной конструкции. Затем по рассчитанным значениям нормальных напряжений у основания сварного шва была построена вспомога-



Рис. 3. Конечно-элементная модель оси прицепа со штампованными ее опорами

Наименование параметра	Значение	Примечание
Толщина свариваемого элемента конструкции, мм	14	—
Относительный градиент нормальных напряжений, $\text{мм}^{-1}$	$1,48 \cdot 10^{-3}$	Вычислено по формуле № 6
Размах нормальных напряжений, $\Delta\sigma$ (МПа)	200,9	—
База тензорезистора, мм	3	—
Расстояние от основного сварного шва до тензорезистора, мм	7	—

тельная прямая (см. рис. 2, б) и найден искомый относительный градиент напряжений ( $\bar{G} = 1,48 \cdot 10^{-3} \text{мм}^{-1}$ ).

Одновременно была экспериментально определена усталостная долговечность для трех осей в сборе. Все они разрушились в результате зарождения и развития усталостных трещин в зоне окончания сварного шва на переходе "труба оси—стенка опоры" (рис. 5), т. е. вблизи зоны установки тензорезистора. Нароботка конструкций до разрушения в форсированном режиме составила соответственно 228, 242 и 297 тыс. циклов.

Максимальные значения нормальных напряжений в рассматриваемых зонах конструкции по данным симметрично расположенных тензорезисторов достигали 206,4 и 211,6 МПа. Для расчетной оценки усталостной долговечности использовалось среднее этих двух значений, т. е.  $\bar{\sigma}_{\max}^3 = 209$  МПа. С учетом асимметрии нагружения  $\bar{\sigma}_{\min}^3 = 10,5$  МПа.

Так как длина базы тензорезисторов была меньше толщины свариваемого элемента конструкции (табл. 2),

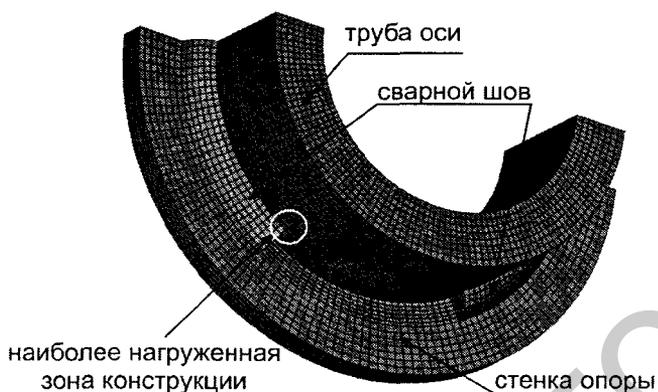


Рис. 4. Конечно-элементная модель фрагмента оси прицепа (подмодель)



Рис. 5. Место разрушения осей при экспериментальном определении их усталостной долговечности в условиях стенда

то значения  $\sigma^*$  рассчитывались по формуле № 9. В итоге получилось  $\sigma_{\max}^* = 211,5$  МПа,  $\sigma_{\min}^* = 10,6$  МПа.

Незначительное отличие величин  $\sigma_{\max}^*$  и  $\sigma_{\min}^*$  от  $\bar{\sigma}_{\max}^3$  и  $\bar{\sigma}_{\min}^3$  вызвано малой величиной относительного градиента нормальных напряжений. Это говорит о том, что через рассматриваемый сварной шов передается невысокая нагрузка, хотя сам он находится в зоне высоконагруженного элемента конструкции — трубы оси.

Уравнение кривой усталости, учитывающее концентрацию напряжений, приведенное в документе [1], имеет вид формулы № 11. Вычисленное по ней число  $N$  циклов до разрушения составляет 180 тыс. и соответствует достаточно высокой (97,6 %) вероятности неразрушения. То есть полученный результат можно считать вполне удовлетворительным. Однако, несмотря на это, для максимального соответствия приведенной на рис. 1 расчетной схеме при экспериментальном определении усталостной долговечности сварных соединений желательно использовать тензорезисторы с размером базы, максимально близким к толщине элемента той конструкции, на который они устанавливаются.

Значение дробной части выражения в формуле № 9 постоянно. Поэтому при экспериментальном исследовании эксплуатационной нагруженности с использованием современной цифровой регистрирующей аппаратуры ее значение может быть использовано в качестве масштабного коэффициента, задаваемого при настройке аппаратуры для расчета и записи измеряемой величины в необходимых единицах. В итоге, в эксперименте вместо процесса изменения значений  $\bar{\sigma}^3$  в памяти регистрирующего устройства будет уже процесс изменения  $\sigma^*$ , ординаты которого сразу готовы к схематизации и последующему расчету усталостной долговечности на основе гипотез суммирования повреждений по уравнению кривой усталости [1]. Это позволит сократить время на обработку данных по предложенному подходу, когда имеется значительное число регистрируемых каналов и режимов эксплуатации.

## Литература

1. Design of steel structures. NORSOK standard N-004. Annex C. Fatigue strength analysis. December 1998. — P. 213–488.
2. Когаев В. П., Дроздов Ю. Н. Прочность и износостойкость деталей машин: Учеб. пособие для машиностр. спец. вузов. — М.: Высш. шк., 1991. — 319 с.