

С. Н. ЯНСКИЙ, О. Н. ПАРАХОНСКИЙ, Д. Ф. АГАФОНОВ,
Н. М. ВЕРШИННИНА

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА АМГ-6

Материал сферических оболочек, нагруженных внутренним давлением, работает в условиях двухосного растяжения. Оценку прочностных и деформационных свойств материала, работающего в подобных условиях, правильнее всего производить, используя зависимость интенсивности напряжений σ_1 от интенсивности деформаций ϵ_1 . Если исходить из теории малых упруго-пластических деформаций Генки-Ильюшина, то применительно к данному материалу зависимость $\sigma_1 - \epsilon_1$ для всех видов напряженно-деформированного состояния будет одной и той же.

Тогда для определения механических свойств материала, работающего в условиях плоского напряженного состояния, можно использовать зависимость $\sigma_1 - \epsilon_1$, полученную при одноосном растяжении. Однако гипотеза Генки-Ильюшина предполагает идеальную однородность и изотропность материала, чего обычно в реальных условиях не наблюдается. В связи с этим возникает необходимость экспериментального отыскания зависимостей $\sigma_1 - \epsilon_1$ при одноосном и двухосном напряженных состояниях и последующего сопоставления их.

1. В общем случае напряженного состояния интенсивность напряжений σ_1 и интенсивность деформаций ϵ_1 определяются выражениями:

$$\sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}; \quad (1)$$

$$\epsilon_1 = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2}. \quad (2)$$

Эти зависимости справедливы как в упругой, так и в пластической областях нагружения. В общем случае деформация ϵ_1 включает упругую и пластическую составляющие, но при больших деформациях величиной упругой составляющей можно пренебречь и счи-

тать (как это и делается в дальнейшем), что интенсивность деформаций ϵ_i определяется только пластическими деформациями.

При одноосном напряженном состоянии главные напряжения равны

$$\sigma_1 = \frac{P}{F}; \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0,$$

где P — растягивающая сила; F — истинная площадь поперечного сечения образца.

Подставляя эти значения в формулу (1), получим

$$\sigma_i = \sigma_1 = \frac{P}{F}. \quad (3)$$

Главные деформации соответственно равны:

$$\epsilon_1 = \ln \frac{L}{L_0}, \quad \epsilon_2 = \epsilon_3.$$

L_0 — первоначальная расчетная длина образца, L — остаточная длина образца после приложения нагрузки P .

Из условия постоянства объема следует

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0.$$

Тогда из формулы (2) получим

$$\epsilon_i = \epsilon_1 = \ln \frac{L}{L_0}$$

Для большинства пластических материалов зависимость $\sigma_i - \epsilon_i$ хорошо аппроксимируется известным выражением

$$\sigma_i = A \cdot \epsilon_i^n, \quad (4)$$

где A — некоторый коэффициент,

n — показатель степени упрочнения.

В книге Губкина С. И. [1] предложена иная форма этой зависимости, а именно

$$\sigma_i = \sigma_{ip} \left(\frac{\epsilon_i}{\epsilon_{ip}} \right)^{\epsilon_{ip}}. \quad (5)$$

Здесь σ_{ip} и ϵ_{ip} — интенсивность напряжений и интенсивность деформаций в образце к моменту образования шейки, равные

$$\sigma_{ip} = \frac{P_{\max}}{F_p} = \sigma_n \frac{l}{l_0},$$

$$\epsilon_{ip} = \ln \frac{l}{l_0}.$$

В этих формулах

P_{\max} — максимальная нагрузка, предшествующая разрушению;

l_p — площадь поперечного сечения образца на участке с равномерным удлинением; l_0 — первоначальная длина участка образца с равномерным удлинением; l — длина того же участка после разрыва образца.

Методика определения величины равномерной деформации в опытах на одноосное растяжение изложена в работе Щеглова Б. А. [2]. Сущность ее заключается в следующем: расчетная длина образца, принимаемая равной 160 мм, разбивается на четыре участка длиной $l_0 = 40$ мм. Затем замеряется длина участка, наиболее удаленного от места разрыва, так как можно считать, что на этом участке деформация остается постоянной по длине и равной той, которая была к моменту образования шейки.

Учитывая, что выражения (4) и (5) представляют одну и ту же зависимость, можно записать, что

$$A = \frac{\sigma_{ip}}{\varepsilon_{ip}}, \quad n = \varepsilon_{ip}.$$

Таким образом, для получения аппроксимирующей функции $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$ достаточно из опыта на осевое растяжение найти величины σ_i и ε_i .

В лаборатории кафедры «Сопротивление материалов» КуАИ были проведены опыты на одноосное растяжение листового материала АМГ-6, позволившие установить, что в исследованном диапазоне толщины листов (4—8 мм) зависимость между σ_i и ε_i может быть представлена в виде

$$\sigma_i = 54 \cdot \varepsilon_i^{0,12}. \quad (6)$$

При этом предел прочности σ_b листового материала АМГ-6 оказался равным 36 кг/мм², интенсивность напряжений к моменту образования шейки $\sigma_{ip} = 41$ кг/мм² и соответствующая интенсивность деформации $\varepsilon_{ip} = 0,12$.

2. Для проведения испытаний на двухосное растяжение была спроектирована и изготовлена установка УИДР, на которой круглые плоские образцы (панели), зажатые по контуру, подвергались вынуживанию посредством гидростатического давления. Предварительные расчеты и эксперименты показали, что материал этих образцов в средней части находится в условиях весьма близких к двухосному напряженному состоянию, аналогичному тому, какое имеет место при работе сферических тонкостенных емкостей, нагруженных внутренним давлением.

Так как главные напряжения в верхней части сферического образца равны

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{pR}{2t}; \quad \sigma_3 = 0,$$

где p — гидростатическое давление, R — радиус сферы образца в зените, t — толщина образца в зените,

то выражение для интенсивности напряжений в этой зоне на основании формулы (1) запишется в виде

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{pR}{2t}.$$

Интенсивность деформаций в верхней части образца определяется по формуле

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_3 = -\ln \frac{t}{t_0},$$

которая получается из выражения (2), если учесть условия симметрии и постоянства объема.

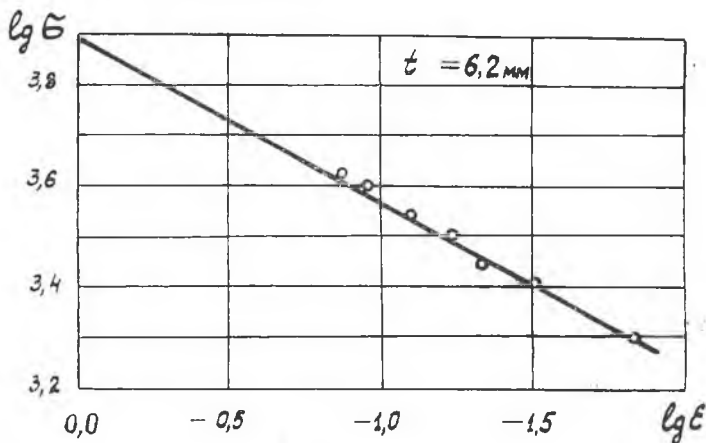


Рис. 1.

Были проведены испытания на двухосное растяжение листового металла АМГ-6 толщиной от 2 до 10 мм. Нагружение оболочки производилось ступенями, причем каждый раз при достижении определенного давления производился замер радиуса кривизны сферы и толщины оболочки. Для определения значений A и n в логарифмических координатах строились графики этих зависимостей $\sigma_i - \varepsilon_i$ для различных толщин листов. Один из таких графиков приведен на рис. 1.

Показатель степени упрочнения n определяется как тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс, а величина $\lg A$ — длиной отрезка, отсекаемого этой прямой на оси ординат. В результате обработки экспериментальных данных была получена аппроксимирующая функция для листов из АМГ-6 при двухосном растяжении в виде

$$\sigma_i = 77 \cdot \varepsilon_i^{0,33}. \quad (7)$$

Из сопоставления этого выражения с формулой (6) видно, что показатель степени n при двухосном напряженном состоянии будет

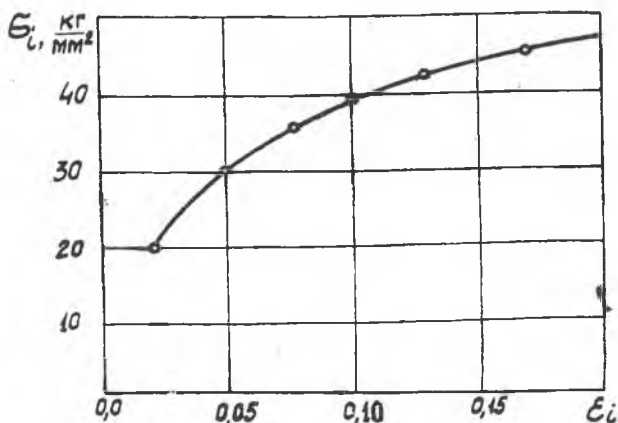


Рис. 2.

почти в три раза больше, чем при одноосном. Последнее свидетельствует о том, что при двухосном растяжении в реальных условиях процесс упрочнения протекает более интенсивно, чем при одноосном, и поэтому зависимость σ_i — ϵ_i , полученную при простом растяжении, нельзя считать универсальной и распространять на другие случаи напряженного состояния. Следовательно, для получения исчерпывающих данных о поведении реального материала в условиях плоского напряженного состояния необходимо проведение экспериментов при соответствующих условиях.

На рис. 2 показан график зависимости σ_i от ϵ_i для листового материала АМГ-6 в случае двухосного растяжения, построенный с помощью аппроксимирующей функции (7).

3. Исследование прочностных и деформационных свойств целого материала, работающего в условиях одноосного и двухосного растяжения, послужило необходимой предпосылкой для изучения работы сварных образцов из АМГ-6 в аналогичных условиях. Конечной целью этих исследований было определение коэффициентов снижения прочности φ сварных соединений, полученных сваркой встык без смещения кромок при одноосном и плоском напряженном состоянии для различных толщин листов.

Для сварных панелей коэффициент снижения прочности подсчитывался через интенсивности напряжений по формуле

$$\varphi = \frac{\sigma_{ip}^*}{\sigma_{ip}}$$

где σ_{ip}^* — интенсивность напряжений в сварной панели к моменту потери устойчивости или образования шейки; σ_{ip} — интенсивность напряжений к этому же моменту в целой панели.

Сварные образцы для испытания на одноосное растяжение вырезались из листов таким образом, чтобы шов располагался посе-

редние расчетной длины образца, которая принималась, как прежде, равной 160 мм. После разрыва образца определялись (по ранее изложенной методике) интенсивности деформаций ϵ_p и напряжений σ_{ip}^* к моменту образования шейки, и затем подсчитывался коэффициент снижения прочности сварного соединения φ . Опыты показали, что коэффициент снижения прочности сварного соединения при одноосном растяжении составляет 0,98. Иными словами, сварные образцы из АМГ-6 при данном виде сварки в случае одноосного растяжения имеют практически такую же прочность, что и целые образцы.

Анализ работы сварных панелей из АМГ-6 в диапазоне толщин листов от 2,85 мм до 6 мм, испытанных на УИДР, показал, что разрушение этих панелей происходит по целому металлу в околошовной зоне. Учитывая это обстоятельство, а также и то, что сварной шов практически не влияет на деформацию металла вдали от шва, была принята следующая методика экспериментального определения предельной интенсивности напряжений при двухосном ра-

Таблица 1

| | | Основное напряженное состояние | Двухосное напряженное состояние |
|-----------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| ЦЕЛЫЕ ОБРАЗЦЫ | $\sigma_{\text{в}} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$ | 36 | — |
| | ϵ_p (%) | 12 | — |
| | $\sigma_{ip} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$ | 41 | 47,8 |
| | ϵ_{ip} | 0,12 | 0,2 |
| | $\sigma_i = A \epsilon_i^n$ | $\sigma_i = 54 \epsilon_i^{0,12}$ | $\sigma_i = 77 \epsilon_i^{0,33}$ |
| СВАРНЫЕ ОБРАЗЦЫ | $\sigma_p \left(\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} \right)$ | 35 | — |
| | ϵ_p (%) | 12 | — |
| | ϵ_{ip} | 0,12 | 0,122 |
| | σ_{ip}^* | 40 | 41 |
| | φ | 0,98 | 0,9 |

нижении сварных панелей. Круглые панели вырезались из сваренных листов таким образом, чтобы шов располагался в стороне от диаметральной линии примерно на 20 мм. Средняя часть шва при этом, хотя и оказывалась несколько смещенной от верхней точки, проходила через зону максимальных равномерных деформаций (результаты ранее проведенных исследований свидетельствуют о том, что диаметр этой зоны составляет не менее 20—25% от диаметра рабочей части панели). После разрушения оболочки в околошовной зоне в зените панели замерялась ее толщина, подсчитывалась предельная интенсивность деформаций ϵ_{ip} . По кривой $\sigma = f(\epsilon)$, построенной для целого материала (рис. 2), отыскивалась соответствующая предельная интенсивность напряжений σ^*_{ip} .

Результаты испытаний сварных панелей приведены в сводной таблице 1, в которой для сопоставления помещены также результаты испытаний целых образцов. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что прочность сварных соединений почти не изменяется по сравнению с целым материалом, если они работают в условиях одноосного напряженного состояния, и заметно снижается (примерно на 8%) в случае двухосного растяжения. Все это еще раз подтверждает ранее сделанный вывод о невозможности достоверной оценки прочностных и деформационных свойств реальных материалов и сварных соединений, работающих в условиях плоского напряженного состояния, на основании одних только опытов при одноосном растяжении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов, т. II.
 2. Щеглов Б. А., Колесников Н. П., Рузанов Ф. И. Определение максимального равномерного удлинения при испытаниях на растяжение. Сб. «Исследование процессов пластической деформации металлов», изд. «Наука», 1965.
 3. Куркин С. А. Технические основы повышения конструктивной прочности сварных тонкостенных сосудов, работающих под статическим давлением. Докторская диссертация, Москва, МВТУ, 1965.
-
-