



ЭФФЕКТ СНИЖЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16 ПРИ ОБРАБОТКЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А. В. БРОДОВОЙ, канд. физ.-мат. наук (Ин-т проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины),
В. А. БРОДОВОЙ, канд. техн. наук, **О. И. ГУЩА**, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
С. Г. БУНЧУК, инж. (Ин-т физики полупроводников НАН Украины)

Изучено влияние экспонирования в неоднородном магнитном поле на сварочные остаточные напряжения в образцах из алюминиевого сплава Д16. Показано, что длительное экспонирование образцов с наплавкой приводит к существенному уменьшению остаточных напряжений. Предложено объяснение наблюдаемому эффекту.

Ключевые слова: металлические конструкции, сварные соединения, остаточные напряжения, неоднородное магнитное поле, акустический контроль

Появление и развитие трещин в реальных конструкциях связано с наличием сварных соединений. Возникающие при сварке растягивающие остаточные напряжения негативно влияют на несущую способность сварных соединений и конструкций в целом. К мерам по снижению растягивающих сварочных напряжений можно отнести отжиг элементов конструкций, локальный отжиг зон сварного соединения газовой горелкой или электрическим током, высокочастотную проковку и др. В данной работе предлагается оригинальный способ снижения остаточных напряжений в сварных соединениях.

Известно [1–3], что дислокационная структура деформированных материалов существенно меняется под воздействием электрических и магнитных полей. Следствием этого, очевидно, должно быть и изменение остаточных напряжений в образцах. Для исследования отмеченного эффекта в магнитном поле испытывали образцы из алюминиевого сплава Д16, широко применяемого в авиационной промышленности ($\sigma_T = 240$ МПа) размером $140 \times 60 \times 3$ мм. Остаточные напряжения наводили путем выполнения точечной аргонодуговой наплавки (диаметр точки 8 мм). Поля остаточных напряжений исследовали с помощью акустического неразрушающего метода [4].

На рис. 1, а представлена окружная компонента остаточных напряжений в зоне наплавки, растягивающаяся с максимальным значением 160 МПа. При удалении от зоны наплавки она постепенно уменьшается и переходит в зону сжатия с максимальным значением -90 МПа. Радиальная компонента (рис. 1, б, кривая 1) в зоне наплавки растягивается максимально со значением 190 МПа. При продвижении к краю образца значения компонент плавно переходят к нулю.

После точечной аргонодуговой наплавки образцы экспонировали в однородном и неоднородном магнитных полях. При экспонировании образцов в однородном магнитном поле с напряженностью $0,3$ Тл в течение 6 мес по сравнению с распределением напряжений в исходном образце изменений не выявлено. Другую серию образцов помещали в неоднородное магнитное поле на 30 и 60 сут. Неоднородность внешнего магнитного поля величиной $dH/dy = 0,1$ Тл/мм достигалась путем расположения магнитных полюсов друг относительно друга так, как показано на рис. 2. Как видно из рис. 1, а, б, кривые 2 после экспонирования образца из алюминиевого сплава с наплавкой в магнитном поле в течение 30 сут остаточные напряжения в зоне аргонодуговой наплавки уменьшаются до значений 90 для окружной и 140 МПа для радиальной компоненты. При удалении от зоны наплавки окружная компонента остаточных напряжений сначала переходит в зону сжатия с максимальным значением -80 МПа, а при приближении

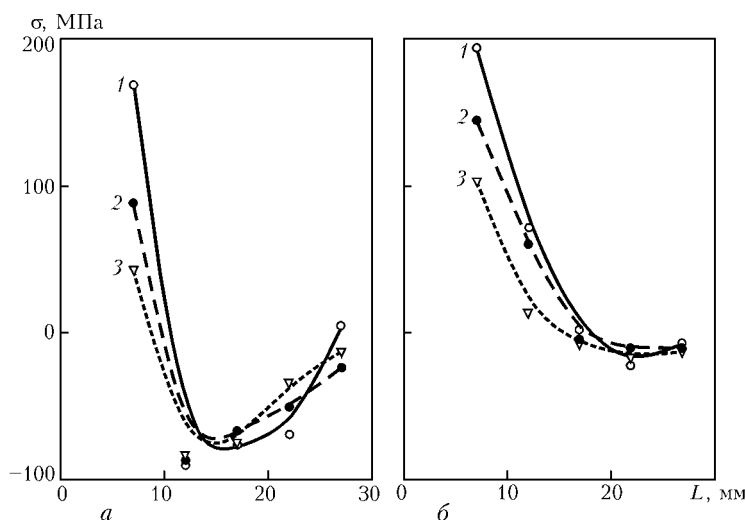


Рис. 1. Распределение окружной (а) и радиальной (б) компонент остаточных напряжений в образце из алюминиевого сплава Д16 с наплавкой в неоднородном магнитном поле: 1 — исходный образец; 2, 3 — соответственно после экспонирования в течение 30 и 60 сут

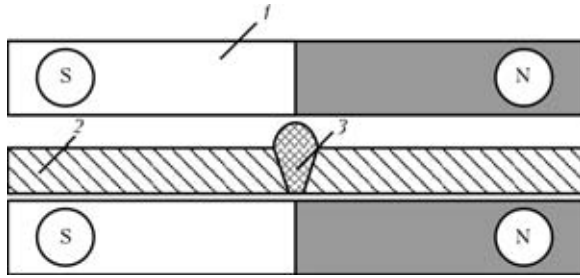


Рис. 2. Схема экспонирования образца алюминиевого сплава наплавкой в неоднородном магнитном поле: 1 — магниты; 2 — образец; 3 — зона наплавки

к кромке образца уменьшается до -20 МПа. Значение радиальной компоненты остаточных напряжений уменьшается до нуля. При дальнейшем экспонировании образца поле остаточных напряжений продолжало меняться. Так, при экспонировании образцов в неоднородном магнитном поле в течение 60 сут значение окружной компоненты остаточных напряжений в зоне наплавки составило 50 (рис. 1, а, кривая 3), а радиальной — 100 МПа. Некоторая неуровненность кривых на рис. 1 объясняется тем, что остаточные напряжения наплавки исследованы на расстоянии 5 мм от линии сплавления основного металла с наплавкой.

Рассмотрим элемент объема образца в магнитном поле, потенциальную энергию которого можно записать в виде $W = -\vec{M} \vec{H}$. В образце из алюминиевого сплава с наплавкой присутствуют растягивающие и сжимающие остаточные напряжения, что приводит к его неоднородной намагниченности $\vec{M} = \chi(x, y, z)\vec{H}$, где χ — магнитная восприимчивость. Между неоднородно намагниченными областями действует сила F , значение которой определяется производной потенциальной энергии по координате

$$\vec{F} = F_1 + F_2 = - \left[M \left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{H}}{\partial y} + \frac{\partial \vec{H}}{\partial z} \right) + H \left(\frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial M}{\partial y} + \frac{\partial M}{\partial z} \right) \right].$$

Для случая однородного магнитного поля сила, действующая на элемент объема, равна

$$F_1 = -H \left(\frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial M}{\partial y} + \frac{\partial M}{\partial z} \right) = -H^2 \left(\frac{\partial \chi}{\partial x} + \frac{\partial \chi}{\partial y} + \frac{\partial \chi}{\partial z} \right).$$

Если магнитное поле неоднородно $\left(\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\partial H}{\partial z} = 0; \frac{\partial H}{\partial y} \neq 0 \right)$, то возникает дополнительная сила, действующая в объеме кристалла V

$$F_2 = -\frac{1}{2} \text{grad} \int_V \vec{M} \vec{H} dV,$$

где dV — элемент объема.

The effect of exposure to a non-uniform magnetic field on residual welding stresses in specimens of aluminium alloy D16 has been studied. It is shown that a long exposure of clad specimens leads to a substantial decrease in the value of residual stresses. Explanation to this effect is suggested.

Таким образом, при наличии двух факторов — зависимости от координат $\chi(x, y, z)$ и неоднородного магнитного поля между отдельными элементами объема кристалла — будут действовать силы $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$, способные вызвать дополнительную деформацию образца.

Рассмотрим упрощенную модель одномерной цепочки атомов, расположенных на одинаковом расстоянии α друг от друга. Минимальная длина волны колебаний такой цепочки равна $\lambda_{\min} = 2\alpha$, ей отвечает максимальная частота ω_{\max} , связанная с длиной волны λ_{\min} соотношением $\omega_{\max} = \pi v / \alpha$, где v — скорость распространения волн в кристалле. Квант тепловых колебаний для ω_{\max} равен $\epsilon_{\phi_1} = \hbar \omega_{\max} = \pi \hbar v / \alpha$. Если в некоторой части цепочки при деформации произойдет увеличение постоянной $b > \alpha$ (растяжение), тогда в этой области $\epsilon_{\phi_1} = \hbar \omega_{\max} = \pi \hbar v / b$ и разность энергий $\epsilon_{\phi_1} - \epsilon_{\phi_2}$ положительная. В противном случае $b < \alpha$ (сжатия), разность $\epsilon_{\phi_1} - \epsilon_{\phi_2}$ отрицательная. Другими словами, нагрузка является источником фононов, накачивающихся в область растяжения из области сжатия. На возможность такой ситуации впервые указано в работе [5], где также отмечено, что все элементарные акты накачки энергии при увеличении связей (в том числе и ее сброс при сжатии) инициируются относительно слабыми энергетическими добавками. По-видимому, оказывается достаточным небольшой добавки магнитной энергии для перехода вещества в более устойчивое энергетическое состояние. Внешним проявлением этих процессов будет наблюдаемое уменьшение остаточных напряжений в алюминиевом сплаве Д16 с наплавкой после экспонирования образцов в неоднородном магнитном поле.

1. Влияние электрического поля на магнитную восприимчивость и залечивание микротрещин деформированных кристаллов цинка / А. В. Бродовой, В. Г. Колесниченко, В. В. Скороход, В. А. Бродовой // Металлофизика и новейшие технологии. — 2001. — 23, № 2. — С. 167.
2. Изменение магнитных и оптических свойств ферромагнитных кристаллов после экспонирования в электрическом и магнитных полях / А. В. Бродовой, В. А. Бродовой, В. Г. Колесниченко, В. В. Скороход // Усп. физики металлов. — 2001. — № 2. — С. 265.
3. Магнитопластический эффект полупроводниковых кристаллов GaAs и Si / А. В. Бродовой, В. А. Бродовой, С. Г. Бунчук, В. В. Скороход // Структурная релаксация у твердых тел: Материалы міжнарод. наук.-практ. конф., Вінниця, 13–15 травн., 2003. — С. 153–154.
4. Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах / А. Н. Гузь, Ф. Г. Махорт, О. И. Гуца, В. К. Лебедев. — Киев: Наук. думка, 1974. — 104 с.
5. Журков С. Н. Физика прочности и пластичности. — Л.: Наука, 1986. — 148 с.

Поступила в редакцию 26.01.2005