



РОЛЬ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ

В. А. ШОНИН, В. С. МАШИН, А. П. МУРАШОВ, В. И. ЗЕЛЕНИН, кандидаты техн. наук,
И. А. ДЕМЬЯНОВ, М. П. ПАШУЛЯ, В. М. ТЕПЛОК, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние газотермического покрытия алюминия на механические свойства стыковых соединений сплава АМг6 с продольным швом, выполненным МИГ сваркой, и модуля упругости покрытия на долговечность.

Ключевые слова: несущие конструкции, сварные соединения, алюминиевые сплавы, защитное покрытие, модуль упругости, сопротивление усталости

Алюминиевые сплавы в атмосферных условиях характеризуются высокой общей коррозионной стойкостью, однако с повышением их прочности они склонны к точечной коррозии [1–3]. Для несущих металлоконструкций из деформируемых алюминиевых сплавов средней и высокой прочности основную опасность в накоплении локализованного усталостного повреждения в поверхностных слоях металла, особенно в зонах концентраторов напряжений и сварных соединениях, представляют окружающая среда и переменность нагрузок при эксплуатации [4–7]. Сопротивление усталости конструктивного элемента имеет максимальные значения в вакууме при минимальной шероховатости поверхности [8], что в реальных конструкциях недостижимо. Для защиты поверхности листового проката из высокопрочных алюминиевых сплавов от атмосферного воздействия применяют плакирование слоем алюминия или его сплава с цинком толщиной 2...4 % толщины основного металла (ОМ) [9]. Сплошной защитный слой отличается меньшим чем ОМ сопротивлением усталости и способствует некоторому снижению долговечности плакированного металла. К тому же, при сварке плавлением образуется незащищенная поверхность шва и нарушается защитное покрытие в околошовной зоне, что представляет одну из проблем эффективного применения сварки, особенно для высокопрочных плакированных сплавов. Защита сварного соединения от атмосферного воздействия является важной задачей, при этом покрытие не должно являться причиной или источником зарождения усталостного разрушения соединения.

Для условий совместного деформирования покрытия и основы решение данной задачи воз-

можно, когда значение предельной упругой деформации металла защитного слоя выше, чем металла сварного соединения. Это условие можно выразить неравенством:

$$\frac{\sigma_{0,01}^p}{E^p} < \frac{\sigma_{0,01}^c}{E^c} \text{ или } \frac{\sigma_{R_\sigma, N}^p}{E^p} < \frac{\sigma_{R_\sigma, N}^c}{E^c}, \quad (1)$$

где $\sigma_{0,01}$ — условный предел упругости; $\sigma_{R_\sigma, N}^p$ — предел усталости для данного значения коэффициента асимметрии цикла R_σ и базовой долговечности N ; E — модуль упругости, а индексы p, c — соответственно для основы и покрытия.

Одним из путей повышения деформационной способности металлического покрытия является снижение модуля упругости защитного слоя, что достигается при увеличении его дискретности при различных способах напыления металла [10–12].

Целью работы является обоснование перспективности применения защитных покрытий, наносимых напылением коррозионностойким материалом на сварные соединения алюминиевых сплавов, эксплуатируемых в условиях циклической нагрузки. В этой связи в работе исследовано влияние защитного газотермического покрытия на механические свойства сварного соединения.

Исследовали сопротивление усталости сварного соединения сплава АМг6 толщиной 2 мм с продольным швом в исходном состоянии после сварки и после применения металлизации алюминия. Стыковое соединение выполняли сваркой плавящимся электродом СвАМг6 диаметром 1,2 мм в аргоне (MIG Pulse) на режиме: $I_{св} = 90...95$ А; $U_d = 17,7...18,0$ В; $v_{св} = 50$ м/ч; $v_{п.п} = 335$ м/мин. Базовое значение тока I_0 (А) и частоты прохождения импульсов $F_{имп}$ (Гц) определяли, как: $I_0 = I_{св}/(1,5...2,0)$; $F_{имп} = KI_0$, где $K = 0,9...1,1$. Покрытие сварного соединения толщиной 0,17...0,26 мм выполняли проволокой диаметром 2 мм из

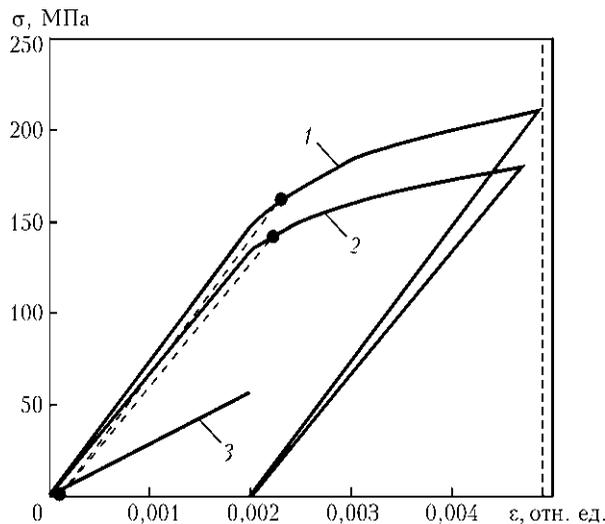


Рис. 1. Экспериментальные диаграммы деформирования при растяжении до условного предела текучести образцов ОМ (1), ОМ с покрытием (2) и расчетная диаграмма упругого деформирования покрытия (3)

алюминия А5 с помощью электродугового металлизатора ЭМ-14М при давлении сжатого воздуха 6 ати на режимах: $I_{д} = 200...250$ А; $U_{д} = 36$ В; дистанция напыления 120 мм; потребляемая мощность процесса 7,2...8,25 кВт. Поверхность под напыление подготавливали с двух сторон соединения струйно-абразивной обработкой электрокорундовой крошкой марки 14А зернистостью 80Н (с размером зерна 0,8...1,2 мм по ГОСТ 3647-89, стандарт FePa фракция F16-F22). При этом применяли сжатый воздух под давлением 6 ати; расстояние до поверхности составляло 60...70 мм; угол направления струи к обрабатываемой поверхности — 75...90°. Получена шероховатость $R_z = 15...20$ мкм.

Значение модуля упругости определяли косвенным методом по результатам испытаний на растяжение образцов ОМ с двухсторонним покрытием и без покрытия. Уточненные значения модуля упругости и механические свойства покрытия определяли прямыми испытаниями на растяжение образцов покрытия, которые изготавливали из коркового напыления алюминиием. Образцы напыленного металла размером 120×10×3 мм вырезали из

Таблица 1. Экспериментальные значения модуля упругости и упругих напряжений для относительной деформации $\epsilon = 0,002$ образцов ОМ в исходном состоянии и с покрытием

| Конструктивный элемент | Толщина элемента t , мм | Напряжения $\sigma_{0,002}$, МПа | Модуль упругости E , ГПа |
|----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| ОМ | 1,73 | 147,3 | 73,7 |
| ОМ с алюминиевым покрытием | 2,03 | 133,9 | 66,96 |
| Алюминиевое покрытие | 0,3 | 56,6* | 28,3* |

* Расчетные данные.

заготовок, полученных корковым напылением на медную подложку. Плотность напыленного металла корковых образцов (2,22 г/см³) определяли измерением массы и объема. Для испытаний на растяжение использовали испытательную машину УМЕ-10тм, деформометр базой 25 мм и двухкоординатный самописец Н207/1.

При определении модуля упругости напыленного слоя алюминия в образцах с покрытием принимали, что остаточные напряжения в покрытии и основе минимальны, а деформации покрытия и основы совместны, т. е.

$$\epsilon = \frac{\sigma^p}{E^p} = \frac{\sigma^{pc}}{E^{pc}} = \frac{\sigma^c}{E^c}, \quad (2)$$

где σ — напряжения в конструктивном элементе для фиксированного значения относительной деформации образца $\epsilon = 0,002$; индекс pc — для основы с покрытием.

Напряжения σ^{pc} и σ^p определяли из диаграмм деформирования образцов с покрытием и без покрытия, а значение напряжения в покрытии σ^c вычисляли из нагрузки P^c , которая развивается в покрытии для конкретного его сечения F^c в образце. При фиксированной ширине конструктивных элементов напряжение в покрытии определяется как

$$\sigma^c = \frac{P^c}{F^c} = \frac{P^{pc} - P^p}{F^c}, \quad (3)$$

где P^{pc} и P^p — экспериментально устанавливаемые нагрузки при испытаниях образцов с покрытием и без покрытия для фиксированной деформации и ширины конструктивных элементов: $P^{pc} = \sigma^{pc} F^{pc}$ и $P^p = \sigma^p F^p$.

Диаграммы деформирования при растяжении до условного предела текучести образцов ОМ с покрытием и без него представлены на рис. 1 вместе с расчетной диаграммой упругого деформирования покрытия, а значения модулей упругости приведены в табл. 1. Характер циклического деформирования образцов напыленного металла и вид излома показаны соответственно на рис. 2 и 3, механические свойства приведены в табл. 2.

Результаты определения модуля упругости покрытия на образцах ОМ с покрытием, полученные по принятой методике, удовлетворительно согласуются со значениями модуля упругости, полученными прямыми экспериментальными испытаниями на образцах напыленного металла. Учитывая, что модуль упругости покрытия меньше почти в три раза модуля упругости основы, и при достаточных значениях предела текучести и пластичности напыленного металла можно ожидать, что покрытие при совместном деформировании с основой не будет вызывать преждевре-

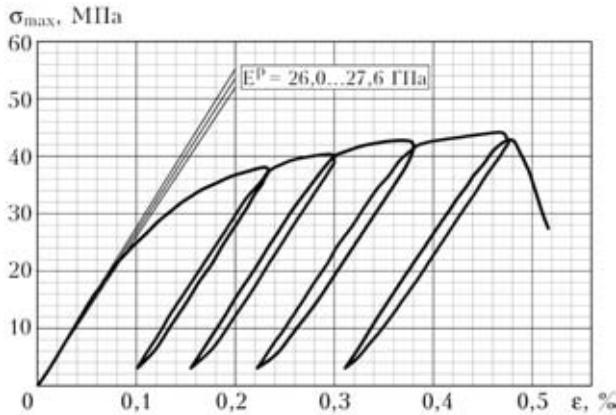


Рис. 2. Диаграмма деформирования при циклическом растяжении до разрушения образца коркового алюминиевого напыления

менное усталостное повреждение сварного соединения.

Испытания на усталость стыковых соединений с продольным швом проводили при отнулевой асимметрии циклического растяжения на машине УЕ-10. Частота нагрузок составляла 4...5 Гц. Применены отдельно сваренные плоские образцы корсетного типа общим размером 250×60×2 мм с шириной в рабочей зоне 30 мм и радиусом закругления 140 мм. Ширина шва составляла 7...8 мм. Для испытаний было подготовлено три группы сварных образцов: в исходном состоянии после сварки; после подготовительной операции струйно-абразивной очистки электрокорундовой крошкой; с покрытием алюминием лицевой и корневой поверхности соединения.

Результаты испытаний представлены номинальными напряжениями, которые рассчитывали, исходя из общей площади поперечного сечения ОМ и металла шва без учета покрытия алюминием в рабочей зоне образца и долговечностью до полного разрушения сварного соединения (рис. 4). Они свидетельствуют о том, что покрытие не влияет на долговечность сварного соединения. Данные сопротивления усталости образцов сварного соединения с покрытием находятся в пределах полосы разброса данных, полученных для соединений в исходном состоянии. К ним близки также результаты испытаний образцов после струйно-абразивной очистки поверхностей соединения.

Таблица 2. Экспериментально определенные механические свойства образцов ОМ сплава АМгб в исходном состоянии и с алюминиевым покрытием, а также образцов коркового алюминиевого покрытия

| Тип образца | Сечение образца, мм | σ_b , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | $\sigma_{0,001}$, МПа | δ_5 , % |
|---|---------------------|------------------|----------------------|------------------------|----------------|
| ОМ без покрытия | 10×1,7 | 368,3 | 211,1 | 161,4 | 18,6 |
| ОМ с покрытием (без учета толщины покрытия) | 10×1,7 | 364,8 | 210,8 | 166,5 | 18,5 |
| ОМ с покрытием | 10×2 | 309,1 | 180,5 | 138,9 | 18,5 |
| Корковое напыление | 10×3 | 44,2 | 42,0 | 24,4 | 0,3 |

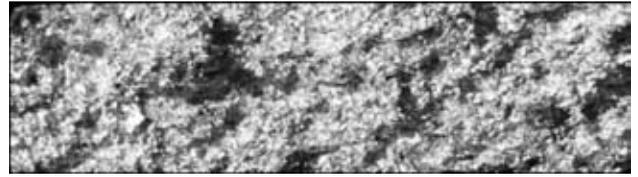


Рис. 3. Внешний вид поверхности излома образца коркового алюминиевого напыления (×10)

В исходных образцах и с покрытием усталостные трещины зарождались в металле шва, основной причиной которых являлись дефекты, в основном одиночные мелкие поры, расположенные в верхней или нижней выпуклостях шва. Слой покрытия из алюминия не являлся источником зарождения трещин и не отслаивался в процессе распространения усталостной трещины и при доломе образца с трещиной. Остаточные напряжения, которые образуются вследствие струйно-абразивной обработки и последующего напыления алюминием, не причастны к усталостному повреждению сварного соединения. Очевидно, их уровни в поверхностных слоях недостаточно высоки, поскольку наличие остаточных напряжений могло бы заметно повлиять на изменение модуля упругости основы, что подтверждает сопоставление механических свойств образцов ОМ в исходном состоянии и с покрытием (табл. 2). При этом напыленный слой металла как конструктивный

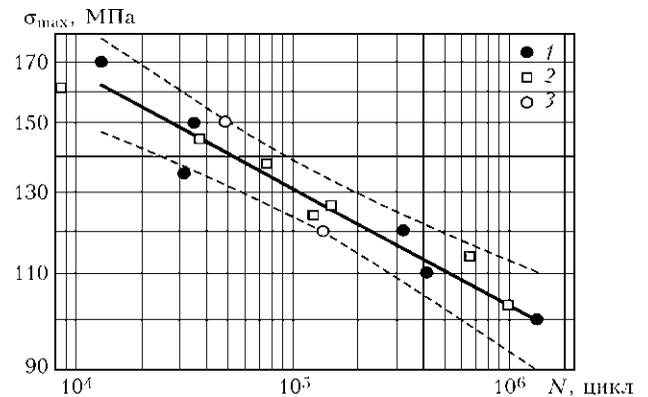


Рис. 4. Сопротивление усталости при отнулевой осевой циклической нагрузке стыковых соединений сплава АМгб с продольным швом, выполненным плавящимся электродом (MIG Pulse): 1 — исходное состояние; 2 — после абразивной очистки; 3 — с покрытием защитным слоем алюминия, выполненным электродуговым напылением



элемент воспринимает на себя незначительную часть нагрузки.

Таким образом, для обеспечения работоспособности защитного покрытия от преждевременного усталостного повреждения в течение длительной эксплуатации конструктивного элемента со сварным соединением важным показателем является низкое значение модуля упругости покрытия по сравнению с основой. При этом надежность покрытия в условиях совместного деформирования с основой обеспечивается также достаточной пластичностью напыленного металла, которая способствует компенсации более высоких упругих деформаций основы.

В заключение следует отметить, что меры по защите от коррозии не могут стать причиной снижения сопротивления усталости основы, если модуль упругости наносимого напылением защитного покрытия ниже, чем у основы.

Значение модуля упругости покрытия следует определять путем расчета из диаграмм напряжение–деформация, полученных при сравнительных испытаниях на растяжение образцов ОМ с покрытием и без него. Показано, что эти данные согласуются с прямым измерением модуля упругости на образцах коркового напыления защитным сплавом.

Установлено, что применение электродуговой металлизации коррозионностойким алюминием А5 для сварных соединений сплава АМг6 с продольным швом, выполненным сваркой неплавящимся электродом (MIG Pulse), не снижает сопротивления усталости основы в условиях осевой переменной нагрузки с отнулевым циклом. Технологию газотермического напыления алюми-

нием можно рекомендовать в качестве защитного покрытия для сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов при условии, если покрытие характеризуется большей, чем основа деформационной способностью.

1. *Аболичина Е. В., Моляр А. Г.* Коррозия алюминиевых конструкций из алюминиевых сплавов // Физ.-хим. мех. материалов. — 2003. — № 6. — С. 106–110.
2. *Алюминиевые сплавы.* Промышленные деформируемые, спеченные и литейные алюминиевые сплавы: Справочное руководство / Под ред. Ф. И. Квасова, И. Н. Фридляндера. — М.: Металлургия, 1972. — 552 с.
3. *Aluminium-handbuch.* — Berlin: VEB Verl. Technik, 1971. — 775 S.
4. *Алюминиевые сплавы.* Применение алюминиевых сплавов: Справочное руководство / Под ред. А. Т. Туманова. — М.: Металлургия, 1972. — 408 с.
5. *Карлашов А. В., Гнатюк А. Д., Кардаш А. Б.* Коррозионно-усталостная прочность алюминиевых сплавов // Сб. тр. I сов.-англ. семинара «Коррозионная усталость металлов». — Киев: Наук. думка, 1982. — С. 206–229.
6. *Кушнаренко В. М.* Стойкость сварных соединений сплава АМг6 при коррозии под напряжением: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1973. — 14 с.
7. *Зверев А. И., Копетман Л. Н.* Влияние детонационных покрытий на сопротивление усталости деталей // Порош. металлургия. — 1990. — № 5. — С. 37–41.
8. *Нейман П.* Физическое металловедение: В 3 т. — М.: Металлургия, 1987. — Т. 3. — С. 392–434.
9. *Алюминиевые сплавы.* Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Справочник / Под ред. В. А. Ливанова. — М.: Металлургия, 1974. — 432 с.
10. *Ляшенко Б. А., Куриат Р. И.* Покрытия и их использование в технике // Прочность материалов и конструкций. — Киев: Академперіодика, 2005. — С. 993–1080.
11. *Долгов Н. А.* Влияние модуля упругости на работоспособность системы основа–покрытие // Пробл. прочности. — 2002. — № 2. — С. 66–72.
12. *Хасуи А., Моригаки О.* Наплавка и напыление / Под ред. В. С. Степина, Н. Г. Шестеркина; пер. с яп. — М.: Машиностроение, 1985. — 240 с.

Influence of gas thermal aluminium coating on mechanical properties of butt joints of AMg6 alloy with a longitudinal weld made by MIG welding and of the modulus of elasticity on the coating fatigue life was studied.

Поступила в редакцию 06.11.2008