



# ВЛИЯНИЕ ЕДИНИЧНЫХ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРУШЕНИЮ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВО-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ

Т. М. ЛАБУР, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние несплошностей (единичных внутренних дефектов) в сварных соединениях высокопрочных алюминиевых сплавов 1421 и 1460. Установлен характер изменения механических свойств и сопротивления разрушению сплавов в зависимости от наличия в них пор и включений оксидной пленки. Показано, что включения оксидной пленки при тех же относительных размерах, что и у пор, в большей степени влияют на свойства сварных соединений.

*Ключевые слова:* сварка плавлением, алюминий-литиевые сплавы, металл шва, единичные сварочные дефекты, поры, включения оксидной пленки, механические свойства, сопротивление разрушению

Отклонения от заданных по технологии режимов сварки алюминиевых сплавов, зачастую имеющие место на практике, приводят к образованию в швах внутренних дефектов — пор и включений оксидных плен. Дефекты больших размеров исправляют путем ремонтной подварки. Мелкие единичные дефекты, как правило, остаются в швах, вызывая при этом локальный рост напряжений. Оксидные пленки приравнивают к классу трещиноподобных дефектов. Влияние последних на прочность в основном оценивается с позиций механики разрушения. Наличие единичных пор в шве является менее опасным, так как они не приводят к хрупкому разрушению металла, однако уменьшают площадь рабочего сечения и тем самым снижают прочность соединений. В критических ситуациях дефекты могут инициировать развитие хрупкой трещины.

Сведения о влиянии дефектов на работоспособность сварных соединений с использованием критериев механики разрушения малочисленны [1–3] и касаются преимущественно сварных соединений среднелегированных сталей. Для высокопрочных сплавов количество таких данных также ограничено. Тем не менее из публикаций известно, что с повышением прочностных свойств металла увеличивается его чувствительность к концентраторам напряжений, особенно при низких температурах. Поэтому изучение особенностей поведения металла швов высокопрочных алюминий-литиевых сплавов, содержащих включения оксидной пленки и имеющих поры, а также определение влияния дефектов на работоспособность сварных соединений и установление допустимых размеров внутренних дефектов в изделиях из сплавов 1421 и 1460 являются актуальными задачами. Именно указанные сплавы проявляют повышенную склонность к образованию технологических дефектов: сплав 1421 — к пористости, а сплав 1460 — к включениям оксидных плен [1]. Кроме того, они используются в аэрокосмической технике, работающей в экстремальных условиях, поэтому

изучение влияния единичных дефектов на работоспособность сварных соединений является очень важным.

Область применения механики разрушения для расчетов допускаемых условий эксплуатации или размеров дефектов зависит от размера дефекта, при уменьшении которого утрачивается инвариантность коэффициента интенсивности напряжения  $K_{Ic}$  — основной характеристики сопротивления разрушению [4]. Вместе с тем высокопрочные алюминиевые сплавы чаще разрушаются под нагрузкой, превосходящей предел текучести сплава, а также после достижения экстенсивной пластической деформации [5]. Для оценки влияния дефектов на изменение сопротивления разрушению были использованы показатели номинального разрушающего напряжения  $\sigma_{р,деф}$  и удельной работы распространения трещины ( $УРРТ_{деф}$ ), получаемые на образцах Кана [4]. Эти характеристики достаточно хорошо коррелируют с величиной  $K_{Ic}$  [6].

Стыковые соединения сплава 1421 получены с применением присадочной проволоки Св-АМг63 диаметром 2 мм, а сплава 1460 — Св-1217. Методика подготовки алюминиевых листов толщиной 6 мм и режимы их сварки были типичными для аргонодугового способа соединения высокопрочных алюминиевых сплавов [2]. Предварительно наличие дефектов определяли по рентгенограммам и протравленным шлифам со стороны корня шва. В окончательном виде размеры дефектов уточняли на изломах образцов после испытания при осевом и внецентренном растяжении. Относительный размер указанных дефектов в швах подсчитывали как отношение площади сечения, которую занимает единичный дефект  $S_{деф}$ , к площади, составляющей разницу между номинальным сечением испытуемого образца  $S_{обр}$  и площадью исследуемого дефекта —  $S_{деф}/(S_{обр}-S_{деф})$ . Прочность сварных соединений и номинального разрушающего напряжения при внецентренном растяжении определяли по отношению  $P/(S_{обр}-S_{деф})$ , где  $P$  — максимальная нагрузка, при которой отмечается нестабильное распространение трещины. Средние значения прочности, пластичности и сопротивления разрушению вычисляли по результатам испытания пяти образцов сварных соединений, которые имели приблизительно

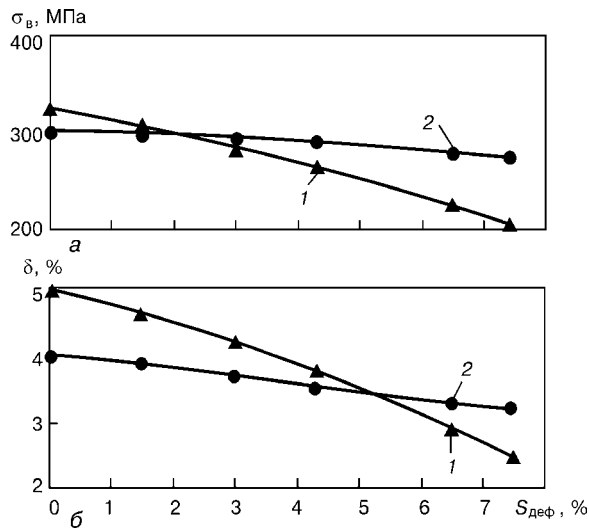


Рис. 1. Зависимость прочности  $\sigma_v$  (а) и пластичности  $\delta$  (б) сварных соединений алюминиевых сплавов от размеров технологических дефектов  $S_{def}$ : 1 — оксидные пленки; 2 — поры

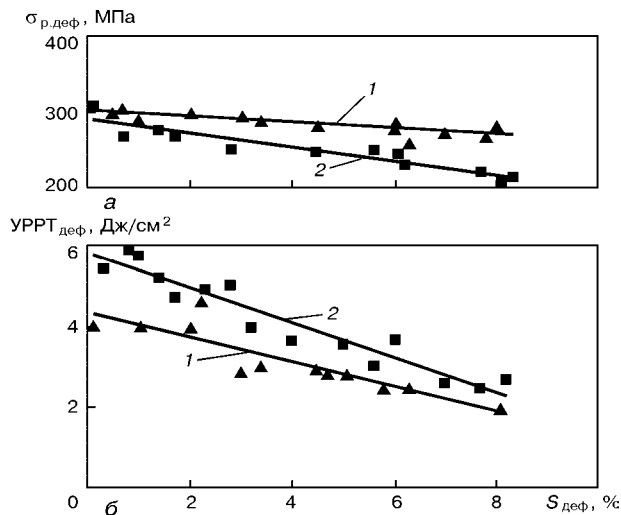


Рис. 2. Влияние размеров технологических дефектов-включений оксидной пленки (2) и пор (1) на  $\sigma_{r,def}$  (а) и  $U_{RP,def}$  (б)

но одинаковое количество включений оксидных плен или пор. Влияние пор исследовали на сварных соединениях сплава 1421, а включений оксидных плен — на соединениях сплава 1460.

Анализ полученных данных показывает, что единичные поры, площадь которых составляет около 1...2 %, снижают прочность по сравнению с бездефектными образцами сварных соединений только на 3...5 % (до уровня 283...297 МПа). Пластичность при этом уменьшается на 10 %, а среднее значение относительного удлинения составляет 3,8 %. Указанная закономерность отчетливо видна на рис. 1. При наличии единичных включений оксидной пленки, которые занимают эквивалентную порам площадь (1...2 %), отмечается их более отрицательное влияние на прочность и пластичность металла шва. Прочность снижается на 10...15 %, а относительное удлинение — на 20...25 % по сравнению с соединениями без дефектов.

Увеличение размера дефектов до 5 % относительно площади рабочего сечения образца приводит к дальнейшему уменьшению показателей механи-

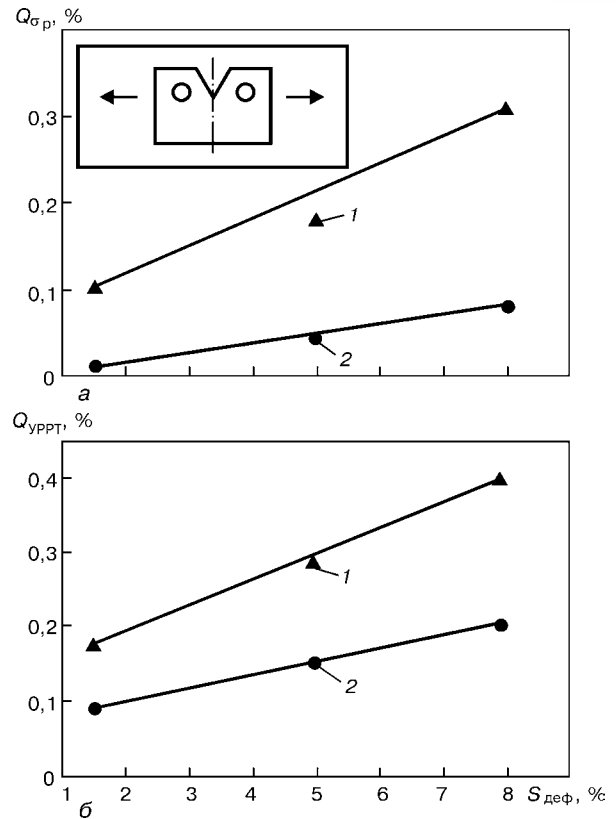


Рис. 3. Чувствительность сварных соединений алюминиевых сплавов в зависимости от вида и размеров технологических дефектов (обозначения кривых 1, 2, как на рис. 1)

ческих свойств сварных соединений. Степень отрицательного влияния включений оксидной пленки выше, чем пор. Относительное удлинение металла таких швов, при котором проявляется склонность металла к пластическому деформированию, при наличии пор уменьшается на 30...50 %, а если в сварных соединениях содержатся единичные включения оксидной пленки — в 2,0...2,5 раза.

Подобное влияние исследуемых дефектов зафиксировано и при оценке параметров сопротивления разрушению — номинального разрушающего напряжения  $\sigma_{r,def}$  и  $U_{RP,def}$  (рис. 2). Единичная пора размером до 2 % относительно площади рабочего сечения образца не оказывает существенного влияния на уровень  $\sigma_{r,def}$ , среднее значение которого составляет 300 МПа. Показатель  $U_{RP,def}$  при этом снижается на 10...15 % по сравнению с таковым сварного соединения без дефектов и составляет в среднем 7 Дж/см<sup>2</sup>. Наличие включений оксидной пленки с теми же размерами более негативно отражается на сопротивлении разрушению соединения. Значение  $\sigma_{r,def}$  соединений с оксидными включениями на 15...20 % меньше, чем у образцов с порами такого же размера. Увеличение размеров отдельных дефектов до 8 % приводит к снижению уровня  $\sigma_{r,def}$  на 13...20 (поры) и на 30...50 % (включения оксидной пленки). Средние значения номинального разрушающего напряжения сплавов 1421 и 1460 при этом равняются соответственно 278 и 255 МПа. Удельная работа распространения трещины ( $U_{RP,def}$ ) уменьшается в 1,5 или 2,0 раза в зависимости от типа дефекта (поры или оксидные пленки). Отмеченное ухудшение механических свойств



и сопротивления разрушению сварных соединений обусловлено воздействием дефектов только как концентраторов напряжения, поскольку из площади расчетного сечения образцов они были исключены.

Учитывая неодинаковое влияние исследуемых дефектов, была определена чувствительность  $Q$  металла швов алюминиевых сплавов 1421 и 1460, содержащих включения оксидных плен или пор эквивалентных размеров (рис. 3). Сопоставление степени воздействия рассматриваемых дефектов на номинальное разрушающее напряжение выполняли согласно уравнению

$$Q = \frac{\sigma_p - \sigma_{p, \text{деф}}}{\sigma_p}$$

Аналогичный подход был применен и для УРРТ<sub>деф</sub>:

$$Q = \frac{(\text{УРРТ} - \text{УРРТ}_{\text{деф}})}{\text{УРРТ}}$$

Как показали результаты расчета, включения оксидной пленки в 1,5... 2,0 раза оказывают большее воздействие на металл в окрестности дефекта, чем поры эквивалентного размера (рис. 3). А резкий характер ухудшения свойств сварных соединений, в которых они находятся, указывает на большую степень концентрации напряжения. По мере увеличения размеров включений оксидной пленки темп ухудшения свойств возрастает в 2... 4 раза (рис. 3). Обнаруженные отличия характера воздействия пленки и пор обусловлены их физической природой, а также геометрическими размерами. Размер пор составил десятые доли миллиметра (от 0,1 до 0,3 мм), а толщина оксидной пленки в большинстве случаев была равна тысячным или десятитысячным долям (от  $1 \cdot 10^{-6}$  до  $1 \cdot 10^{-2}$ ) миллиметра.

Анализ и обобщение экспериментальных результатов показывают, что предельным размером оксидной пленки является 3 %, а пор — 5 % относительно рабочего сечения. Разрушение исследуемых сварных соединений происходило по месту залегания дефекта. При меньших размерах дефектов образцы разрушались по основному металлу.

## Выводы

1. Наличие единичных внутренних дефектов в швах высокопрочных алюминий-литиевых сплавов

The effect of discontinuities (isolated inner defects) in welded joints of high-strength aluminium alloys 1421 and 1460 was studied. The nature of change of the alloy mechanical properties and fracture toughness was established, depending on the presence of pores and oxide film inclusions in them. It is shown that oxide film inclusions at the same relative dimensions, as those of the pores, have a greater effect on welded joint properties.

1421 и 1460 размером 1... 2 % от площади рабочего сечения снижает показатели прочности и относительного удлинения, а также сопротивления разрушению металла. Включения оксидной пленки уменьшают уровень прочности на 10... 15, а относительного удлинения — на 20... 25 % (поры соответственно на 3... 5 и 10 % по сравнению с бездефектными образцами).

2. Дефекты с относительным размером до 5 % ограничивают склонность к пластическому деформированию металла сварных соединений на 30... 50 % при наличии пор и в 2 раза при включениях оксидной пленки. Увеличение размера оксидных включений до 8 % относительно площади рабочего сечения приводит к резкому снижению уровня прочности (на 20... 25 % при осевом растяжении) и номинального разрушающего напряжения (на 30... 40 % при внецентренном растяжении). В соединениях с порами эти показатели снижаются на 15... 20 % относительно швов без дефектов. Воздействие включений оксидных пленок на энергию распространения трещины в 2... 3 раза больше, чем пор эквивалентного размера, что необходимо учитывать при разработке технологии сварки узлов и конструкций ответственного назначения из сплавов 1421 и 1460.

3. Предельный размер дефектов, встречающихся в сварных соединениях высокопрочных алюминий-литиевых сплавов, может составлять не более 5 % площади рабочего сечения (для соединений, содержащих поры) или 3 % (для оксидной пленки).

1. Рабкин Д. М. Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов. — Киев: Наук. думка, 1986. — 254 с.
2. Ищенко А. Я. Сварка легких сплавов и металлических композиционных материалов // Автомат. сварка. — 1991. — № 6. — С. 26–31
3. Кушкина С. И. Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов. — М.: Металлургия, 1981. — 280 с.
4. Херицберг Р. В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов. — М.: Металлургия, 1989. — 575 с.
5. Статическая прочность и механика разрушения сталей / Под ред. В. Даля, В. Антона; пер. с нем. — М.: Металлургия, 1986. — 565 с.
6. Kobayashi T. Strength and fracture of aluminum alloy // J. of Light Metal Welding and Construction. — 1982. — 32, № 10. — P. 539–552.

Поступила в редакцию 10.11.2000