

УДК 621.791.7:539.43

К 50

ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 2024-T3 ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКОЙ

И. Н. Клочков, науч. сотр.;

И. В. Березин, мл. науч. сотр.;

А. Ю. Туник, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, м. Киев

Аннотация. Исследовано влияние послесварочной обработки высокочастотной механической проковкой (ВМП) на сопротивление усталости сварных соединений высокопрочного алюминиевого сплава AA2024-T3 толщиной 2 мм, выполненных высокопроизводительной сваркой плавящимся электродом в среде инертных газов (MIG-Pulse). Предложены оптимальные параметры ВМП, обеспечивающие повышение сопротивления усталости исследуемых соединений на базе 2×10^6 циклов нагружений до 40%.

Ключевые слова: высокочастотная механическая проковка, сопротивление усталости, напряжения, сварка алюминиевых сплавов, коэффициент концентрации напряжений.

Анотація. Досліджено вплив післязварювальної обробки високочастотним механічним проковуванням (ВМП) на опір втомі зварних з'єднань високоміцного алюмінієвого сплаву AA2024-T3 товщиною 2 мм, виконаних високопродуктивним зварюванням плавким електродом у середовищі інертних газів (MIG-Pulse). Запропоновано оптимальні параметри ВМП, що забезпечують підвищення опору втомі досліджуваних з'єднань на базі 2×10^6 циклів навантажень до 40%.

Ключові слова: високочастотне механічне проковування, опір втомі, напруження, зварювання алюмінієвих сплавів, коефіцієнт концентрації напружень.

Abstract. The impact of the post-welding treatment by the high-frequency mechanical hammering (HMT) on the fatigue resistance of the welded joints of the high-strength AA2024-T3 aluminum alloy with thickness of 2 mm has been studied. These welded joints are produced with the highly productive welding by the consumable electrode in the inert gas medium (MIG-Pulse). The optimal HMT parameters are offered which provide the resistance increase of the studied joints fatigue on the base of the 2×10^6 loading cycles up to 40%.

Keywords: high-frequency mechanical hammering, fatigue resistance, stress, aluminum alloys welding, stress concentration factor.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Алюминиевые сплавы по изготовлению и использованию занимают второе место после стали. Благодаря своим физико-механическим, коррозионным и технологическим свойствам легкие сплавы на основе алюминия успешно используются не только для изготовления летательных аппаратов, но и в других отраслях машиностроения (судостроение, автомобильный и железнодорожный транспорт, сельскохозяйственное и пищевое машиностроение) [2, 5].

Традиционными методами соединения компонент во многих конструкциях являются механические соединения (заклепки, болты и т. п.), что приводит к значительным затратам времени. Путем замены заклепочных соединений на сварные можно достигнуть значительной экономичности производства наряду со снижением веса и улучшением эксплуатационных свойств. Для этого разрабатываются современные высокопродуктивные технологии производства легких конструкций [1, 2, 5]. Изготовление алюминиевых сварных конструкций по ряду причин

всегда являлось сложной задачей для конструкторов и технологов [1, 2].

Тонколистовые алюминиевые сплавы широко применяют в силовых конструкциях транспортных средств, эксплуатируемых в условиях действия переменных нагрузок. Изготовление сварных конструкций из тонколистовых сплавов сопровождается рядом технологических сложностей, таких, как нерегулярная геометрия шва, большие углы перехода металла шва на основной металл, значительная выпуклость шва по сравнению с толщиной свариваемого листа. К основным критериям прочности и долговечности сварных соединений элементов конструкций относят показатели сопротивления усталости. Геометрическая и структурная неоднородности в зоне соединения, а также наличие послесварочных остаточных напряжений обуславливают значительную концентрацию действующих напряжений, которая и является одной из главных причин снижения сопротивления усталости соединения по сравнению с основным металлом [1, 3].

Для обеспечения необходимой долговечности применяют различные конструктивно-технологические

решения, в частности дополнительные послесварочные обработки, направленные на перераспределение послесварочных остаточных напряжений растяжения (например, общая и местная термообработка, предварительная статическая перегрузка или вибрационная обработка), наведение благоприятных остаточных напряжений сжатия (локальный нагрев, взрывная обработка или поверхностный наклеп) в зонах сварных соединений. В свою очередь, высокочастотная механическая проковка сварных соединений является высокопроизводительной малозатратной технологией послесварочной обработки сварных соединений поверхностным пластическим деформированием (ППД).

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Технология ППД, основанная на использовании энергии ультразвука и которая получила в научной литературе название высокочастотной механической проковки (ультразвуковая ударная обработка) [4, 6, 7], нашла широкое применение для повышения характеристик сопротивления усталости сварных узлов и элементов конструкций. Высокочастотная механическая проковка является ударной обработкой поверхности металла высокопрочными бойками, механические колебания которых возбуждаются ультразвуковым генератором через преобразователь электрических колебаний в механические. Детальное описание существующих схем реализации ВМП представлено в работах [6, 7]. В отличие от других способов поверхностной обработки, ВМП может реализовываться как на производстве, так и в полевых условиях. Поэтому ВМП рассматривают как один из наиболее перспективных способов повышения сопротивления усталости с точки зрения технологичности.

Поскольку усталостные трещины в сварных соединениях зарождаются в зонах перехода шва на основной металл, подвергать ВМП целесообразно только эти области. Основными факторами повышения долговечности при ВМП являются увеличение радиуса сопряжения шва с основным металлом, наведение благоприятных остаточных напряжений



Рис. 1. Геометрические параметры канавки, образованной после применения ВМП сварного соединения с бойками различного диаметра: ЗТВ — зона термического воздействия

сжатия в поверхностных слоях металла, улучшение структуры и деформационное упрочнение металла в зоне обработки. В результате обработки на поверхности соединения образуется характерная канавка, геометрические параметры которой зависят от применяемых сменных бойков для ВМП (рис. 1).

При обработке сварных соединений тонколистовых алюминиевых сплавов необходимо учитывать, что в подповерхностных слоях металла в зоне обработки возникают высокие остаточные напряжения растяжения, которые уравнивают напряжения сжатия на поверхности. Чем тоньше обрабатываемый металл, тем выше будут значения этих напряжений и их градиентов.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — определение оптимальных параметров проведения ВМП сварных соединений высокопрочного алюминиевого сплава AA2024-T3 толщиной 2 мм и экспериментальная оценка повышения их сопротивления усталости в сравнении с необработанными соединениями и основным металлом.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Исследования проводили для соединений высокопрочного алюминиевого сплава AA2024-T3, выполненных сваркой плавящимся электродом в среде инертных газов (MIG-Pulse). Сварка образцов для исследований производилась по разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона технологии на отработанных режимах.

По результатам исследования микроструктуры шва установлено, что дефектов, трещин и сколов в зоне соединения нет (рис. 2). После ВМП в обрабатываемом

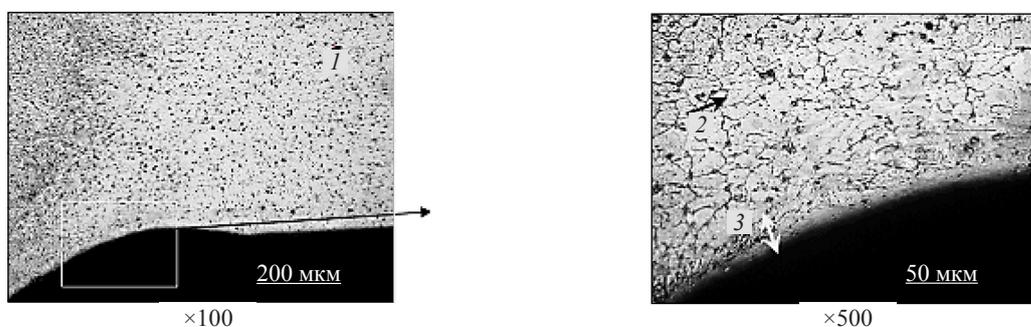


Рис. 2. Микроструктура зоны перехода металла шва на основной металл сплава 2024-T3 после ВМП: 1 — основной металл; 2 — ЗТВ; 3 — зона деформации

слое обнаружено изменение зеренной структуры. Глубина деформированного слоя составляет около 20 мкм. Вытянутые деформированные зерна расположены вдоль линии обработки.

Графическая зависимость твердости приведена на рис. 3. Увеличение твердости в обрабатываемой зоне обусловлено эффектом деформационного упрочнения материала.

Для разработки оптимальных параметров ВМП были произведены расчеты теоретических коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях в исходном состоянии и после обработки бойками диаметром 2, 3 и 5 мм. Параметры профилей швов, необходимых для определения этих коэффи-

циентов, рассчитывали на основании профилограмм сварных соединений. Типовые профилограммы соединений после ВМП показаны на рис. 4.

Установлено, что ВМП бойками диаметром 3 мм с лицевой стороны и 2 мм с корневой при линейной скорости прохода инструмента вдоль шва 8...10 мм/с приводит к снижению коэффициента концентрации напряжений с лицевой стороны с 1,62 в исходном состоянии до 1,12 после ВМП; с корневой стороны — с 1,73 до 1,32 соответственно.

Образцы для испытаний на усталость (рис. 5) изготавливали из отдельно сваренных заготовок размерами 260×90×2 мм с использованием вводных и выводных пластин.

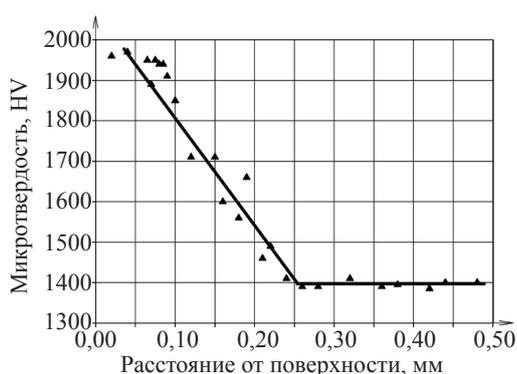


Рис. 3. Изменение микротвердости в обработанном сплаве 2024-T3

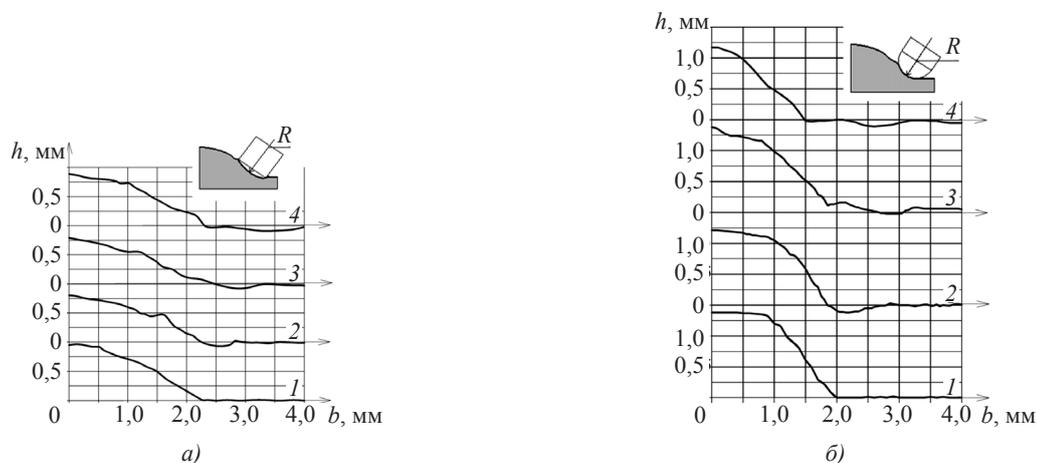


Рис. 4. Влияние диаметра бойка на формирование зоны перехода шва к основному металлу с лицевой (а) и корневой (б) сторон шва: 1 — исходное состояние; 2 — ВМП бойками диаметром 2 мм; 3 — ВМП бойками диаметром 3 мм; 4 — ВМП бойками диаметром 5 мм

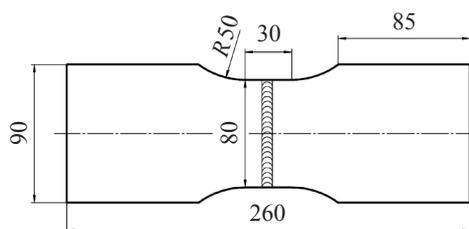


Рис. 5. Образцы для испытаний на усталость

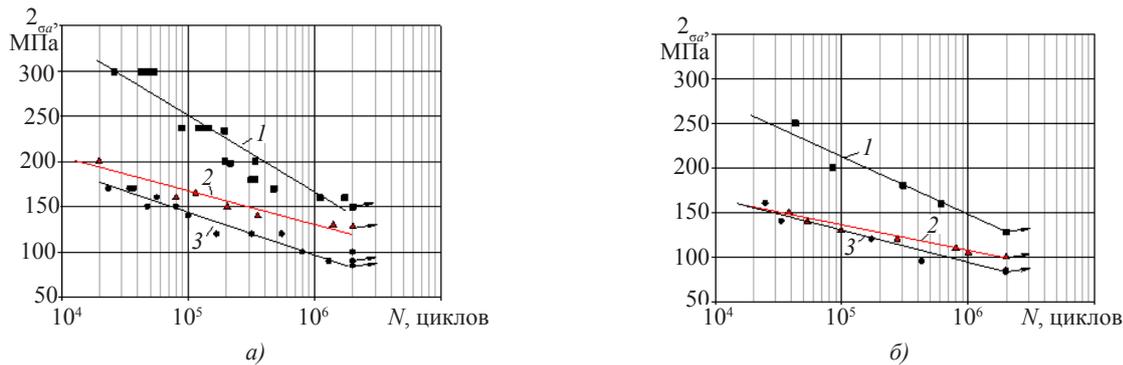


Рис. 6. Результаты испытаний на усталость сварных соединений сплава AA2024-T3 при асимметрии цикла нагружения $R_{\sigma}=0,1$ (а) и $R_{\sigma}=0,4$ (б): 1 — основной металл; 2 — обработка ВМП; 3 — исходное состояние после сварки

Испытания на усталость проводили при одноосном нагружении на универсальной сервогидравлической испытательной установке MTS 318.25. Нагрузку прикладывали перпендикулярно к шву по синусоидальному циклу с асимметрией цикла нагружения $R_{\sigma}=0,1$ и $R_{\sigma}=0,4$ до полного разрушения образцов.

Кривые усталости по результатам испытаний показаны на рис. 6. Как свидетельствуют данные исследований, при асимметрии цикла нагружения $R_{\sigma}=0,1$ долговечность сварных соединений, обработанных ВМП, повышается в 2...3 раза на всей базе испытаний. При асимметрии цикла $R_{\sigma}=0,4$ эффект проковки несколько снижается вследствие релаксации остаточных напряжений при более высоких максимальных напряжениях цикла. Повышение сопротивления усталости на базе долговечности $N=2 \times 10^6$ циклов

нагружений для $R_{\sigma}=0,1$ и $R_{\sigma}=0,4$ составляет 40 и 30% соответственно.

ВЫВОДЫ

1. Установлена эффективность локальной высокочастотной проковки сварных соединений высокопрочного тонколистового (толщиной 2 мм) алюминиевого сплава AA2024-T3.

2. Отработан режим ВМП тонколистовых алюминиевых сплавов, обеспечивающий минимальное изменение геометрии сварного соединения. Диаметр бойков для обработки лицевой стороны составляет 3 мм, корневой — 2 мм, линейная скорость перемещения инструмента 8...10 мм/с.

3. Повышение условного предела выносливости на базе 2×10^6 циклов нагружения составляет 40% при асимметрии $R_{\sigma}=0,1$ и 30% — при $R_{\sigma}=0,4$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом в аргоне тонколистовых алюминиевых сплавов [Текст] / В. С. Машин, В. А. Шонин, М. П. Пашуля [и др.] // Автоматическая сварка. — 2010. — № 5. — С. 49–53.
- [2] Ищенко, А. Я. Особенности применения алюминиевых высокопрочных сплавов для сварных конструкций [Текст] / А. Я. Ищенко // Автоматическая сварка. — 2004. — № 9. — С. 16–26.
- [3] Шонин, В. А. Сопротивление усталости сварных соединений алюминиевых сплавов с учетом влияния остаточных напряжений [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. А. Шонин. — К. : Институт электросварки им. Е. О. Патона, 1984. — С. 16.
- [4] Шульгинов, Б. С. Ускоренный метод оценки эффективности ультразвуковой ударной обработки сварного соединения [Текст] / Б. С. Шульгинов // Проблемы прочности. — 1995. — № 9. — С. 80–84.
- [5] Albert, D. Aluminum alloys in arc welded constructions [Text] / D. Albert // Welding in the world, 1993. — Vol. 32, nr 3. — P. 97–114.
- [6] Kudryavtsev, Y. Increasing Fatigue Strength of Welded Elements and Structures by Ultrasonic Impact Treatment [Text] / Y. Kudryavtsev, J. Kleiman / International Institute of Welding. — Document XIII-2318-10. — 2010.
- [7] The efficiency of ultrasonic impact treatment for improving the fatigue strength of welded joints [Text] / V. Trufiakov, E. Statnikov, P. Mikheev [at al.] / International Institute of Welding. — Document XIII-1745-98. — 1998.

© І. М. Клочков, І. В. Березін, А. Ю. Тунік

Надійшла до редколегії 21.11.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК
д-р техн. наук, проф. Л. І. Коростильов

Статтю розміщено у Віснику НУК № 5, 2012