

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ В СВАРНОМ ШВЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг6, ПОЛУЧЕННОГО СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

В.А. Клименов^{1,2} д.т.н, проф., Ю.А. Абзаев¹ д.ф.-м.н, проф., А.А. Клопотов^{1,3}, д.ф.-м.н. проф., С.А. Поробова¹, магистрант

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия

³Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

634003, г. Томск пл. Соляная 2, тел. (3822)-65-07-23

E-mail: klopotovaa@tsuab.ru

1. Введение

В настоящее время наблюдается широкое использование сплавов на основе алюминия. Для изготовления конструкций и технических изделий требуется их соединение. Одним из перспективных методов соединений в изделиях является метод сварки трения с перемешиванием (СТП) [1]. Сильной стороной метода СТП по сравнению с обычными методами является отсутствие расплава и дефектов, которые образуются при затвердевании жидкого металла в сварочной ванне [2]. С другой стороны, полученное структурно-фазовое состояние должна приводить к значительным внутренним напряжениям. Для уменьшения напряженного состояния сварных швов применяются, как правило, последующие обработки. Учитывая особенности СТП, наиболее подходящими являются методы нетермической природы. Применение ультразвуковой обработки (УЗ) снижает дефектность сварного соединения [3]. Поэтому применение УЗ позволяет значительно улучшить чистоту поверхности, что благоприятно влияет на усталостные свойства соединений. Поэтому рентгеноструктурные исследования необходимы для выяснения особенностей структурно-фазового состояния сплава в области сварного шва.

Цель работы – провести рентгеноструктурные исследования влияния ультразвуковой обработки на сварной шов, полученный методом сварки трением с перемешиванием.

2. Материалы и методы исследования

Для исследования использовали алюминиевый сплав АМг6 (цифровая маркировка сплава 1561). Зона сварки трением шовного соединения АМг6 получается высокочастотным вращением инструмента, при этом температура зоны не превышает $\sim 0.6 T_{пл}$. Сварной шов получался при оптимальных режимах обработки, обеспечивающих повышенные прочностные характеристики соединения [2] за счёт термомеханических процессов в зоне соединения. Исследуемые образцы сварных соединений подвергались ультразвуковой выглаживающей обработке в соответствии со схемой (рис. 1).



Рис. 1. Схема областей съемки рентгенограмм и определения микротвердости:

1 – в исходном состоянии; 2 – вдали от шва; 3 – в сварном шве;

4 – в шве, обработанном ультразвуком

При УЗ обработке поверхность подвергалась воздействию твердосплавного шарика, который динамически взаимодействовал с поверхностью с частотой 24 кГц, что приводило к вдавливанию твердосплавного шарика в поверхность при постоянном давлении. В результате УЗ обработки происходит механическое взаимодействие, определяемое ударным нагружением, периодически повторяющимся и распространяющимся на сравнительно малую площадь. Таким образом, на обрабатываемой поверхности возникают быстро чередующиеся деформации сжатия и сдвига.

Дифракционные исследования проводились на дифрактометре ДРОН4 – 07 по схеме Брегга-Брентано с шагом 0.02° и временем экспозиции в точке 1 с в угловом диапазоне $2\Theta=17 - 102^\circ$. Было использовано медное излучение $\text{Cu}_{K\alpha}$. Съёмки проводили с разных мест образца (рис. 1). Качественный фазовый анализ дифрактограмм проводили с помощью программы Match Gems (версия Tgial).

Расчет параметра решетки твердого раствора АМгб на основе обработки дифрактограмм проводили методом Ритвельда [4].

Напряжения 1-го и 2-го рода оценивались соответственно по формулам

$$\sigma = \frac{E}{\mu} \varepsilon_{CM} = \frac{E \Delta d}{\mu d} \text{ и } \sigma = \frac{E}{\mu} \varepsilon_H, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона, d – межплоскостное расстояние плоскостей отражения, ε_{CM} – деформация, связанная со смещением рефлексов, ε_H – деформация, связанная с уширением рефлексов. Для кубических кристаллов $\Delta d/d = \Delta a/a$, где a – параметр решетки. При комнатной температуре модуль Юнга и коэффициент Пуассона были взяты равными $E=65.79$ ГПа и $\mu=0.337$ [5] соответственно.

Неоднородные поля внутренних напряжений (напряжения 2-го рода) анализировались по уширению рефлексов методом Уоррена-Авербаха. При этом учитывалось, что и уменьшение областей когерентного рассеяния также вызывает уширение брэгговских рефлексов твердого раствора.

Прибором для измерения микротвердости служил микротвердомер МПТ-3М, тест-объектом являлся свежий скол кристалла поваренной соли (NaCl). Для получения отпечатка использовался алмазный наконечник (четырёхгранная пирамидка). Нагрузка на образец – 10 Гс. Микротвердость определяли на пластинах сплава в местах, указанных на рис.1.

3. Результаты и обсуждение

На основе обработки дифрактограмм определен параметр решетки твердого раствора АМгб в сплаве с разных мест образца. Полученные экспериментальные значения параметра решетки твердого раствора исходного сплава (вдали от сварного шва и без ультразвуковой обработки) несколько меньше соответствующих значений чистого Al ($a_{Al}=0,404969$ нм) [6]. Известно, что входящие в состав сплава легирующие добавки Mg, Mn, Zn, Cu и Si, находясь в твердом растворе на основе Al, поразному влияют на параметр решетки (рис. 2). Видно, что Mg заметно повышает значения параметра решетки твердого раствора, тогда как легирование Mn, Zn, Cu и Si приводит к его понижению. В предположении аддитивности вкладов легирующих элементов в изменение параметра решетки была проведена оценка концентрации Mg в твердом растворе на основе Al (рис. 2). Видно, что концентрация Mg в исходном состоянии без ультразвуковой обработки имеет значение, близкое к значениям, полученным в [2]. С другой стороны, согласно кривой растворимости (рис. 3), эта концентрация соответствует термической обработке сплава АМгб в области температур 150 – 200 С.

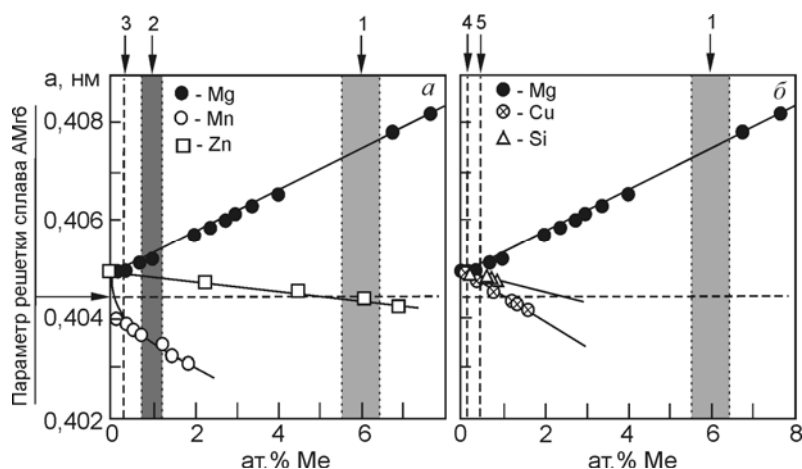


Рис. 2. Изменение параметра решетки в твердом растворе алюминиевых сплавов в зависимости от концентрации легирующего элемента. Пунктирной линией и серыми областями показаны области значений легирующих элементов в сплаве: 1 – Mg; 2 – Mn; 3 – Zn; 4 – Cu; 5 – Si. Стрелкой отмечено значение параметра решетки от исходного исследуемого сплава. Концентрационные значения параметров решетки взяты из [7]

В твердом растворе сплава на основе Al концентрация Mg превышает соответствующее значение в объеме сплава как после обработки ультразвуком, так и в области сварного шва (даже с учетом того, что произошло растворение всех частиц фазы $\beta\text{-Al}_2\text{Mg}_3$). В принципе такое растворение частиц может произойти и в результате СТП и ультразвуковой обработки, так как сплав в зоне СТП нагревается до температур 220 – 400 С [2]. Это согласуется и с данными по растворимости Mg в Al (рис. 3).

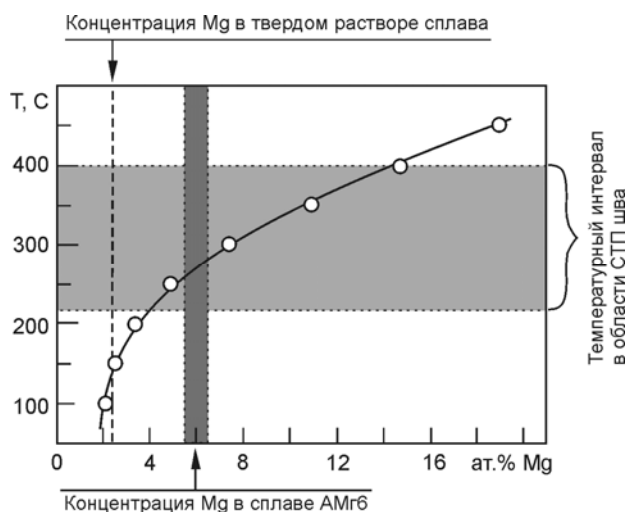


Рис. 3. Растворимость Mg в твердом растворе Al на основе ГЦК решетки [8]

Однако следует отметить, что даже полное растворение частиц $\beta\text{-Al}_2\text{Mg}_3$ не позволит достичь концентрации выше 6,5 ат.% Mg (табл. 1). Поэтому не представляется возможным объяснить повышение значений параметра решетки твердого раствора в сплаве на основе Al только за счет растворения частиц фазы $\beta\text{-Al}_2\text{Mg}_3$.

Таблица 1

Состав алюминиевого сплава АМг6

Элементы	Si, %	Fe, %	Cu, %	Mn, %	Mg, %	Zn, %	Al, %
Содержание	0,40	0,40	0,10	0,7–1,1	5,5–6,5	0,20	~ 92,5%

Был проведен расчет напряжений первого рода, возникающих в твердом растворе без учета изменений значений параметра решетки за счет изменения концентрации атомов Mg в решетке твердого раствора. Полученные значения микротвердости коррелируют с результатами рентгеноструктурного исследования.

Таким образом, можно предположить, что полученные рентгеноструктурным методом значения параметра решетки твердого раствора в сплаве как в области СТП шва, так и после ультразвуковой обработки определяются, как минимум, двумя процессами: высокими значениями микронапряжений первого рода и изменением концентрации атомов Mg в решетке твердого раствора

Заключение

Рентгеноструктурным методом установлено увеличение параметра решетки твердого раствора сплава в зоне сварки. Это изменение параметра решетки твердого раствора происходит за счет значительного растворения частиц $\beta\text{-Al}_2\text{Mg}_3$ с содержанием магния более высоким, чем в матрице. При этом происходят интенсивные диффузионные и релаксационные процессы, которые способствуют процессам перемешивания атомов в сплаве сваркой трением.

В статье использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта Министерства образования и науки Российской Федерации (№ 8.1.42.2015), в рамках Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» в 2015 г. и по государственному заданию в сфере научной деятельности (проект №11.351.2014/К).

Литература.

1. Клименко Ю.В. Способ сварки металлов трением//А.с. СССР №195846.- 1967.

2. Хайдаров А.А., Клименов В.А., Азаркин А.В. и др. Влияние частоты вращения инструмента на формирование стыковых соединений пластин из алюминиевого сплава 1561 при сварке трением с перемешиванием // Контроль. Диагностика. – 2013. – №13. С.186-191.
3. Panin A.V., Pochivalov Yu.I., Son A.A., Klimenov V.A., Kazachenok M.S. The effect of ultrasonic treatment on mechanical behavior of titanium and steel specimens // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2004. – V 41. N 1–3. – P.163–172.
4. Клопотов А.А., Абзаев Ю.А., Потекаев А.И., Волокитин О.Г. Основы рентгеноструктурного анализа в материаловедении. / Томск.: Изд-во ТГАСУ. – 2012. – 275 с.
5. Физические величины. Справочник / Бабичев А.П., Бабушкина Н.А. и др. – М.: Энергоатомиздат. 1991. – 1232 с.
6. Эмсли Дж. Элементы. – М.: Мир. – 1993. – 256 с.
7. Pearson W.B. A handbook of lattice Spacing and Structures of Metals and Alloys. - London, New York: Pergamon Press, 1958. – 1300 p.
8. Лякишева Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. / М.: Машиностроение. – 1996. Т.1. 991 с.

**СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ
МОДИФИЦИРОВАННОГО ДВУХЛУЧЕВОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА И КОМПЬЮТЕРНОЙ
ОБРАБОТКИ ИНТЕРФЕРОГРАММ**

М.Ф. Носков, д.т.н., профессор кафедры ФП, С.С. Овчинников инженер-технолог
СФУ (Саяно-Шушенский филиал СФУ).*

*655619, Россия, Республика Хакасия, г. Саяногорск, рп Черемушки, д. 46, а/я 83
Тел.: 89039022952, e-mail: egg1@rambler.ru*

** АО «Швабе — Оборона и Защита», отдел №36*

*630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/2, тел.: 89618724966
E-mail: serpanya@yandex.ru*

Переход к нанотехнологиям поставил перед наукой и техникой ряд новых специфических задач, обусловленных малыми размерами элементов и структур. В нанотехнологиях как нигде актуален тезис «если нельзя измерить, то невозможно создать» [1]. Достижение предельных возможностей при измерении рельефа поверхности возможно с использованием методов растровой электронной и сканирующей зондовой микроскопии [2] (СЗМ) в сочетании с эталонной световой интерферометрией.

Преимущество световой интерферометрии состоит в том, что возможна привязка к первичной, хорошо известной единице – длине световой волны. К недостаткам интерференционных измерений относят невысокую чувствительность измерений, порядка десятых долей длины волны применяющегося излучения, что для видимого света составляет около 50 нанометров.

В данной работе рассмотрен способ повышения чувствительности измерений, основанный на последовательном применении двух известных методов – нелинейной фоторегистрации интерференционной картины и обработки зарегистрированной картины при помощи программы Femtoscanner. Интерферометрические методики по-прежнему востребованы по причине необходимости решения задачи привязки измеряемого параметра к первичному эталону.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Сама схема интерференционных измерений была предложена еще Майкельсоном. Принцип действия интерферометра Майкельсона состоит в делении светового пучка на два при помощи полупрозрачного зеркала. Затем, их направляют на эталонную и исследуемую поверхности. После чего происходит сведение отразившихся пучков вместе при помощи полупрозрачного зеркала. При этом, создается интерференционная картина, по анализу которой делают заключение о форме микрогеометрии исследуемого зеркала. Так как длина волны света известна, то можно напрямую измерить характеристики профиля поверхности, например, высоту ступеньки дифракционной решетки.

Такой способ широко применяется до настоящего времени, чаще всего используется микроинтерферометр МИИ-4. При этом разрешение по высоте, обусловленное чувствительностью двухлучевой интерферометрии, составляет около 50 нанометров, что существенно больше, чем необходимо для нанометрических измерений [3-6].