

УДК 667.64:678.026

А.В. Шарко, Б.И. Морозов

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕРМОУПРОЧНЯЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Приведены результаты измерений электрофизических и прочностных свойств: пределов прочности, текучести, относительного удлинения, твердости, электропроводности, частоты автоциркуляции ультразвуковых колебаний образцов из термоупрочняемого сплава АК4-1 после закалки от разных температур. Предложена и апробирована комплексная система контроля качества термообработки: температуры нагрева под закалку и температуры старения, включающая последовательность операций измерения удельной электрической проводимости, твердости и частоты автоциркуляции, как производной скорости распространения поверхностных акустических волн.

Актуальность темы. Высокая химическая стойкость к влиянию агрессивных сред, повышенные физико-механические свойства, улучшенная коррозионная стойкость и износостойкость обуславливают широкое применение алюминиевых сплавов в различных отраслях промышленности. Сложные условия эксплуатации технического оборудования в условиях агрессивных сред при знакопеременных нагрузках и высоких температурах обуславливают повышенные требования к эксплуатационным характеристикам материалов. Особенно высокие требования предъявляются: температурным режимам закалки и старения, обеспечивающим необходимый комплекс прочностных свойств. Превышение температуры закалки выше допустимого предела приводит к пережогу материала, характеризуемого резким снижением механических свойств. Поскольку это является неисправимым браком производства, разработка методов оценивания физических и технологических свойств материалов является актуальной научной и практической задачей.

Анализ публикаций и достижений по проблеме оценивания технологических свойств материалов [1-5] показывает, что на практике качество термообработки деталей и заготовок из алюминиевых сплавов контролируется на основании записей температурных режимов закалки и старения с помощью термопар и дополнительных испытаний механических свойств и микроструктуры образцов-свидетелей.

Такая система контроля в ряде случаев, например при термообработке особо ответственных деталей, оказывается недостаточной. Как правило, термопары устанавливаются в одной-двух точках печи во избежание помех при загрузке деталей. Вместе с тем в воздушных печах с принудительной циркуляцией воздуха при укладке деталей больших размеров и сложной конфигурации имеет место эффект экранировки, приводящий к колебаниям температуры в разных зонах печи до нескольких десятков градусов.

Таким образом, в реальной ситуации температура нагрева под закалку разных деталей может оказаться различной и существенно отличаться от температуры нагрева образцов-свидетелей. Но даже небольшие, в пределах 10–15°C, отклонения температуры нагрева под закалку от оптимальных температур для термоупрочняемых алюминиевых сплавов оказывают значительное влияние на механические и коррозионные свойства материала изделий. Нагрев выше верхнего значения допустимых температур вызывает рост зерна, окисление и оплавление границ зерен, что приводит к резкому падению прочности и пластичности. При занижении температуры нагрева под закалку происходит неполное растворение интерметаллических соединений в твердом растворе и, в конечном счете, снижение прочности и коррозионной стойкости материала. На свойства деталей и заготовок могут оказать влияние и другие трудноучитываемые факторы, в том числе уменьшение скорости охлаждения при закалке и задержка нагретых деталей при их переносе из печи в закалочную ванну.

Для повышения надежности оценки качества термообработки в некоторых случаях наряду с контролем образцов-свидетелей проводятся механические испытания и металлографический контроль микроструктуры одной-двух деталей из каждой партии, подвергающихся термообработке. Однако такой контроль требует значительных затрат, так как связан с разрушением деталей и изготовлением из них разрывных образцов и большого количества макрошлифов, вырезанных из различных зон деталей. Кроме того, металлографический

контроль не гарантирует надежного выявления пережога в его начальной стадии, и, как следствие, возможны случаи перебраковки изделий.

Целью работы является разработка метода оценки технологических свойств термоупрочняемых алюминиевых сплавов на базе изучения взаимосвязей физико-механических свойств и технологических параметров структурообразования материалов.

Изложение основного материала. Известно, что для сплава АК4-1 оптимальные механические свойства и коррозионная стойкость обеспечиваются в сравнительно узком диапазоне температур старения – от 185 до 195°C. Занижение температуры старения на 10 – 20°C относительно оптимальных значений приводит к снижению коррозионной стойкости и уменьшению пределов прочности σ_B и пределов текучести $\sigma_{0.2}$, а завышение температуры старения вызывает перестаривание сплава, происходит снижение σ_B и $\sigma_{0.2}$.

Диапазон оптимальных температур для нагрева изделий из сплава АК4-1 под закалку 525 – 535°C [5]. При завышении температуры нагрева под закалку на 15 – 25°C наблюдается перегрев сплава и снижение пределов прочности σ_B , пределов текучести $\sigma_{0.2}$ и относительного удлинения δ , дальнейший рост температуры нагрева под закалку приводит к пережогу и катастрофическому падению его прочностных и пластических свойств.

Как показали исследования автора, опубликованные в [3,4], при нагреве изделий до температуры нагрева под закалку, превышающей 570°C, резко увеличивается коэффициент затухания ультразвука, что позволяет по результатам измерений этого параметра определять установившуюся стадию пережога. Для выявления возможных завышений температуры закалки на 15 – 30°C, приводящих к начальной стадии пережога, более перспективным оказывается контроль технологических параметров термообработки по изменениям скорости продольных ультразвуковых волн. Однако практическая реализация метода с использованием продольных волн связана с большими трудностями из-за сравнительно небольшой толщины подавляющей части деталей и их сложной конфигурации. В связи с этим представляет интерес оценка возможности замены в качестве рабочей характеристики скорости продольных волн на скорость поверхностных волн, возбуждение и прием которых осуществляется при одностороннем доступе к изделию с помощью отдельных излучателя и приемника, расположенных на фиксированной базе.

Расчеты скоростей продольных C_l и поверхностных $C_{пов}$ волн с использованием справочных данных [5] для упругих констант из сплава АК4-1 в отожженном состоянии и после закалки с последующим старением дают для относительных изменений скоростей близкие значения:

$$\left(\frac{\Delta c}{c}\right)_l = 0,97\%, \quad \left(\frac{\Delta c}{c}\right)_{пов} = 1,3\%. \quad \text{Это показывает, что для контроля температурных режимов}$$

закалки могут быть использованы измерения как C_l так и $C_{пов}$.

Для измерений использовали призматические датчики с уменьшенной зоной акустического контакта (рис. 1). Пьезопреобразователь имел волновод в виде скошенной призмы, угол при вершине которой удовлетворял условию $0 < \beta < \frac{\pi}{2} - \alpha_{кр}$, где $\alpha_{кр}$ – второй критический угол для границы раздела волновода и изделия; β – угол, образованный акустической осью пьезоэлемента и контактной поверхностью призмы.

С целью обеспечения максимального переноса энергии ультразвуковой волной расстояние от точки ввода ультразвуковых колебаний до пьезоэлемента вдоль его акустической оси выбирали таким образом, чтобы оно не превышало ближней зоны дифракции Френеля. В качестве жидкости, обеспечивающей акустический контакт между пьезопреобразователем и контролируемым изделием, использовали трансформаторное масло.

Особое внимание уделяли технологии нанесения контактной жидкости. Способ нанесения этой жидкости непосредственно перед контролем на всю поверхность изделия в данном случае недопустим, поскольку энергия ультразвуковой волны из-за растекания по поверхности трансформаторного масла уменьшается и возникают мешающие отражения. Поэтому контактной жидкостью смачивали только зоны соприкосновения пьезопреобразователей с изделием; пространство между пьезопреобразователями оставалось незаполненным. Для исключения растекания

трансформаторного масла в процесі вимірювань місце вводу і приєма ультразвукових коливань екранували технічним войлоком, легко поглинаючим контактну рідину. Шлях ультразвукової хвилі при цьому способі збудження коливань зображений на рис. 1 сплошної ліній.

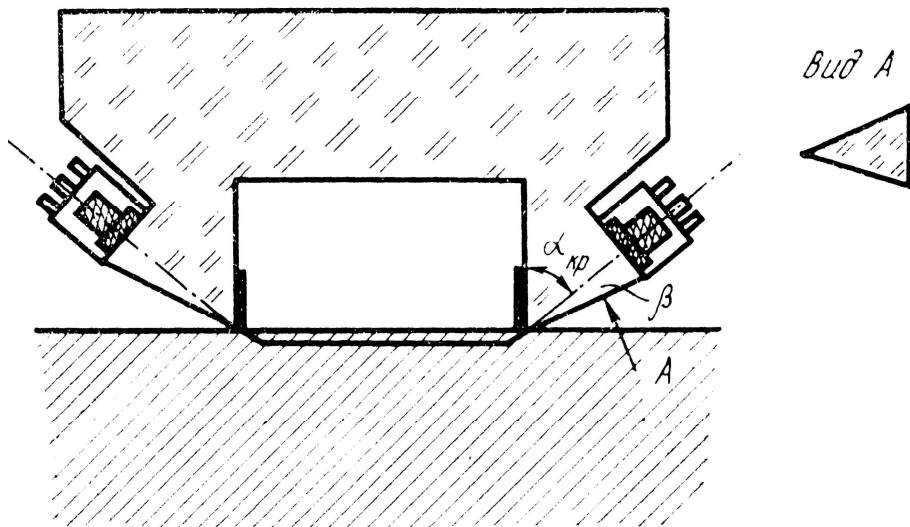


Рис. 1. Пьезопреобразователь для измерений скорости поверхностной акустической волны

Температурні режими нагрівів під закалку і старіння контролювали по частоті автоциркуляції імпульсів f , яку визначали як середнє арифметичне з 3-5 показань частотомера при різних установах пьезопреобразователей на контролюєму об'єкті. Результати вимірювань межів міцності σ_B , межів текучості $\sigma_{0,2}$, твердості по Брінеллю і відносного подовження δ представлені в табл. 1.

На рис. 2 зображений графік залежності частоти автоциркуляції імпульсів f від температури нагріву під закалку. Кожна точка на графіку є усередненням результатів вимірювань трьох зразків з однаковою температурою заковки. Залежність частоти f від температури заковки носить нелінійний характер, тому чутливість експеримента S в різних температурних діапазонах різняча. В діапазоні температур 540 – 560°C вона складає

$$S = \left| \frac{\Delta f}{\Delta T} \right| = \left| \frac{f_{560} - f_{540}}{T_{560} - T_{540}} \right| = \left| \frac{88,02 - 89,02}{20} \right| \frac{\text{кГц}}{^\circ\text{C}} = 50 \frac{\text{Гц}}{^\circ\text{C}}$$

Таблица 1

Физико-механические свойства образцов из сплава АК4-1 при разных температурах заковки

Температура заковки, °C	Механические свойства после заковки и старения при 190°C – 12ч				Электрофизические и акустические свойства в свежезакаленном состоянии	
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	HRB	γ , Мсм/м	f , кГц
510	390-400	340-350	8-8,5	69-72	20,5-21,0	88,87-88,91
520	415-430	360-370	7-7,5	73-76	20,0-20,5	88,96-89,01
530	420-435	365-375	7-7,5	74-77	19,5-20,0	89,10-89,16
540	420-435	365-375	6,5-7,0	75-78	19,0-19,7	88,98-89,04
560	400-420	350-360	5,5-6,0	72-74	18,5-19,0	88,00-88,06
570	150	-	2,0	70	18,5-18,75	87,10-87,25
580	130	-	2,0	40	18,5	85,90-86,10

В диапазоне температур 560 – 570°C чувствительность увеличивается и составляет $85 \frac{\text{Гц}}{^\circ\text{C}}$. При дальнейшем росте температур S достигает $115 \frac{\text{Гц}}{^\circ\text{C}}$.

С учетом отклонений частоты f от средних значений на $\pm (20 \div 50)\text{Гц}$ при контроле разных плавок можно считать, что погрешность определения температуры закалки в интервалах, соответствующих как начальной, так и установившейся стадии пережога, не превышает 2 – 3°C, что гораздо меньше погрешности измерений температуры в печах с помощью термопар, составляющей $\pm 5^\circ\text{C}$.

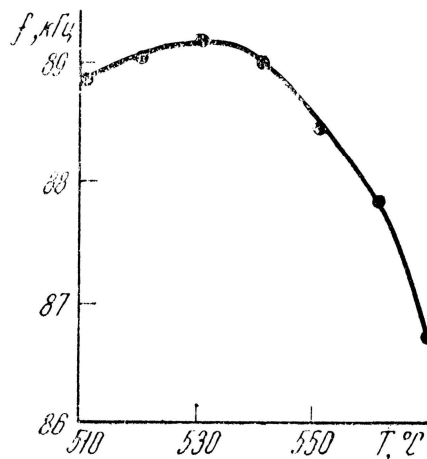


Рис. 2. Взаимосвязь частоты автоциркуляции импульсов поверхностной акустической волны и температуры закалки сплава АК4-1 после старения при 190°C – 12ч

Несмотря на высокую чувствительность, возможности акустического метода контроля ограничены. Это обусловливается наличием явно выраженного максимума на графике зависимости f от температуры закалки (см. рис. 2). Каждому значению f в области максимума соответствуют два значения температуры закалки, поэтому акустический метод может быть рекомендован для выявления мест с температурой нагрева под закалку, превышающей 550°C.

Более широкие возможности открываются при комплексном контроле температурных режимов закалки с применением вихревого и акустического методов.

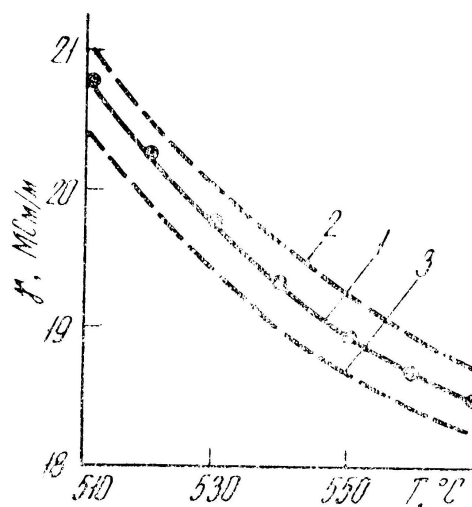


Рис. 3. Зависимость удельной электрической проводимости от температуры закалки сплава АК4-1 в свежезакаленном состоянии

На рис. 3 представлені залежності удельної електричної провідності γ від температури закалки поковок в свежезакаленному стані. Кожна точка на кривій 1 є усередненим значенням γ для поковок різних плавів з однаковою температурою закалки, а на кривих 2 і 3 вони відповідають найбільшим і найменшим значенням γ при цих температурах. Як видно з рисунка, з ростом температури нагріву під закалку γ монотонно зменшується. Однак контроль температурних режимів закалки тільки вихретоковим методом не ефективний через велике впливання коливань хімічного складу в межах марки матеріалу на величину електропровідності γ . Погрешність оцінки температури закалки при такому контролі досягає $\pm 10^\circ\text{C}$.

При температурі старіння до 130°C і видержці від 12 год до 7 днів прочностні, пластичні та електрофізичні властивості сплаву АК4-1 практично не змінюються. З ростом температури від 150°C до 170°C поступово підвищується межа міцності та текучості σ_B , σ_{02} і зменшується відносне подовження δ . Твердість сплаву збільшується при температурі старіння 170°C за 12 год до 68–71 HRB і за 24 год – до 70–74 HRB. Удельна електрична провідність γ зростає при 170°C за 12 год на 0,25–0,30 Мсм/м і досягає в залежності від хімічного складу матеріалу 17,8–19,3 Мсм/м. При цьому відбувається розпад твердого розчину з виділенням фази як по границях зерен, так і по окремим зернам, однак при старінні виявляється нерівномірність цього розпаду, що обумовлює низьку корозійну стійкість.

В процесі старіння при 180 – 200°C уже після 12 год прочностні властивості досягають максимальних значень, твердість сплаву при 180 – 195°C становить 73–76 HRB, а при 200°C 71–74 HRB. Величина γ різко зростає. Аналіз мікроструктури показує, що розпад твердого розчину йде рівномірно по всьому об'єму зерен, що обумовлює підвищення корозійної стійкості сплаву в декілька разів.

Старіння при температурі вище 200°C призводить до коагуляції продуктів розпаду твердого розчину і, в кінцевому рахунку, до зниження прочностних властивостей та твердості. Так, при 210°C твердість сплаву падає до 65–69 HRB.

На основі виконаних експериментальних досліджень запропонована система комплексного незрушального контролю технічних параметрів термоупрочнюваних алюмінієвих сплавів. При комплексному контролі температурних режимів закалки деталей зі сплаву АК4-1 вихретоковим та акустичними методами первісно за величиною удельної електричної провідності відбираються всі деталі з $\gamma < 20$ Мсм/м, закалені при температурі, перевищуючій 530°C , а потім за результатами акустичних вимірювань відбраковуються деталі, закалені при температурі вище 540°C .

Висновок. Комплексний контроль за сукупністю електрофізичних та акустичних параметрів дозволяє виявити як початкову, так і установившися стадію пережога.

1. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довід. посіб. / під ред. В. В. Панасюка. – Т.9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів і елементів конструкцій / О.П. Осташ, В.М. Федірко, В.М. Учанін та ін. – Львів: Сполом, 2007. – С. 1068.
2. Царенко В.К., Куц Ю.В. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник. – Київ: НТУУ «КПІ», 2010. – С. 448.
3. Морозов Б.И., Шарко А.В. Установление закономерностей связи между показателями твердости и акустическими свойствами материалов / Б.И. Морозов, А.В. Шарко // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції, 10-12 жовтня 2012 р. – Херсон, 2012 р. – С. 236-238.
4. Морозов Б.И. Акустические исследования структурно-чувствительных характеристик сталей и сплавов / Б.И. Морозов // Вісник Херсонської державної морської академії. - №2(7). – 2012. – С. 52-57.
5. Промышленные алюминиевые сплавы. справ. изд. – под ред. Алиева С. Г., Альтмана М.Б., Амбарцумяна С.М. и др. – М.: Металлургия, 1984, С. 109—121.