

УДК 621.791.13

В.Н. КОВАЛЕВСКИЙ, д-р техн. наук,
Г.М. СЕНЧЕНКО, канд. техн. наук,
Н.И. УРБАНОВИЧ, канд. техн. наук (БНТУ)

**ОБРАБОТКА ВЗРЫВОМ И ИСКУССТВЕННОЕ
СТАРЕНИЕ ДЮРАЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16Т**

Дюралюминиевый сплав Д16 относится к классу деформируемых материалов, упрочняемых термообработкой. С целью повышения прочностных свойств его подвергают процессу закалки с последующим естественным (Д16Т) или искусственным (Д16Т1) старением.

Естественное старение дюралюминия заключается в вылеживании сплава после закалки в течение 4–5 суток при комнатной температуре. В это время в твердом растворе протекают диффузионные процессы, связанные с выделением зон Гюнье-Престона [1], обогащенных атомами меди и когерентно связанных с решеткой алюминия. При этом не происходит разупрочнения сплава и при любом увеличении длительности выдержки ему присущ определенный комплекс механических и физических свойств (временное сопротивление разрыву $\sigma_b = 440$ МПа, относительное удлинение $\delta = 15\text{--}20\%$).

При повышении температуры старения до 150 °С и выше (искусственное старение) в местах с повышенной концентрацией меди формируются упрочняющие интерметаллидные фазы. При увеличении температуры старения или времени выдержки происходит заметный рост упрочняющих фаз и их коагуляция с разупрочнением сплава.

Для достижения более высокого уровня свойств дюралюминиевого сплава применяют его термомеханическую обработку, наиболее распространенными схемами которой являются следующие [2–4]:

– закалка + деформация + естественное (искусственное) старение;

– закалка + естественное старение + деформация + искусственное старение.

В обеих схемах деформация ускоряет процесс распада пересыщенного твердого раствора и при оптимальных режимах обработки достигаются следующие характеристики сплава [4]: $\sigma_b = 480$ МПа, $\sigma_{0,2} = 475$ МПа, $\delta = 8$ %.

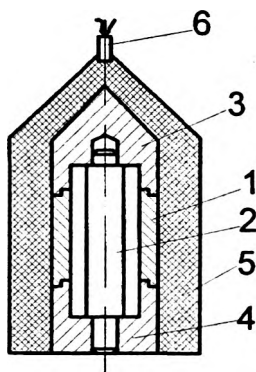
Одной из разновидностей деформационно-термического упрочнения сплава Д16 является применение импульсной (взрывной) обработки в сочетании с закалкой и старением сплава [5]. Максимальный упрочняющий эффект при этом был достигнут после искусственного старения при температурах 120–150 °С обработанного ударными волнами естественностаренного сплава Д16Т: $\sigma_b = 560$ МПа, $\delta = 11,1$ %.

Еще большими возможностями упрочнения обладает высокоскоростная (взрывная) пластическая деформация трубных заготовок на цилиндрическую оправку. При обработке сплава Д16 по схеме: «закалка 500 °С в воду + естественное старение + упрочнение взрывом + естественное старение» достигнуто максимальное из известных по литературным источникам значение временного сопротивления разрыву $\sigma_b = 600$ –630 МПа [6]. Установлено, что в зависимости от степени пластической деформации дюралюминиевого сплава легирующие элементы Си и Mg могут как выделяться из α -твердого раствора, так и растворяться в нем, что сопровождается соответственно образованием и разрушением упрочняющих зон Гюнье-Престона, фаз *S* и *Q*. При этом зоны Гюнье-Престона и интерметаллидные фазы выделяются преимущественно на дефектах кристаллической решетки и равномерно распределены по объему зерна.

Учитывая, что максимальный упрочняющий эффект от ударно-волновой обработки сплава Д16 был достигнут после его искусственного старения [5], были проведены дополнительные исследования по влиянию термической обработки на свойства обработанного взрывом сплава Д16Т (по схеме, показанной на рисунке 1).

Искусственное старение проводили при температурах 150, 175, 200 °С в течение 30 ч. Механические свойства сплава Д16Т в зависимости от времени выдержки приведены на рисунках 2–4.

Анализ данных старения при температуре 150 °С (рисунок 2) показывает незначительное изменение механических свойств. В начальный период ($\tau = 3$ ч) σ_b снижается до 580 МПа с одновременным повышением пластичности сплава (δ – до 8 %, ψ – до 16 %). В дальнейшем σ_b и δ практически не изменяются на протяжении всего исследуемого периода старения, а относительное сужение постепенно повышается до 22 %.



1 – труба упрочняемая; 2 – оправка; 3 – откольный элемент верхний; 4 – откольный элемент нижний; 5 – заряд ВВ; 6 – электродетонатор
Рисунок 1 – Схема упрочнения взрывом

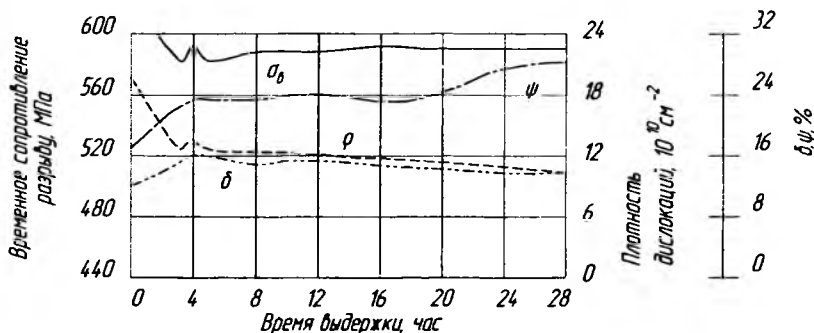


Рисунок 2 – Свойства сплава Д16Т после старения при 150 °С

Результаты рентгеновских исследований показали, что в течение первых трех часов происходит значительное снижение плотности дислокаций ρ с $23 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ до $11 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, чем и объясняются изменения временного сопротивления разрыву сплава в этот промежуток времени.

Увеличение времени выдержки приводит к появлению избыточных фаз CuMgAl , CuAl_2 и в небольшом количестве Mg_2Si , однако эти фазы на рентгенограммах фиксируются линиями слабой интенсивности, имеют «размытый» характер, что затрудняет определение их абсолютной величины. Выдержке $\tau = 7 \text{ ч}$ соответствует максимальное значение избыточных фаз, а при дальнейшем увеличении времени старения наблюдается тенденция к их уменьшению. Экстремальные точки на графике $\sigma_{\text{в}} = f(\tau)$ при $\tau = 4 \text{ ч}$ и $\tau = 7-8 \text{ ч}$ объясняются увеличением в первом случае плотности дислокаций, во втором – ростом микроискажений кристаллической решетки, вызванных в обоих случаях появлением и ростом частиц упрочняющих фаз.

Аналогичная картина наблюдается при старении сплава Д16 при температуре $175 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 12–14 ч (рисунок 3). При большем времени выдержки временное сопротивление разрыву монотонно падает, незначительно уменьшается относительное удлинение. Такое поведение материала соответствует образованию частиц стабильных δ и θ -фаз, что подтверждается рентгеновскими исследованиями.

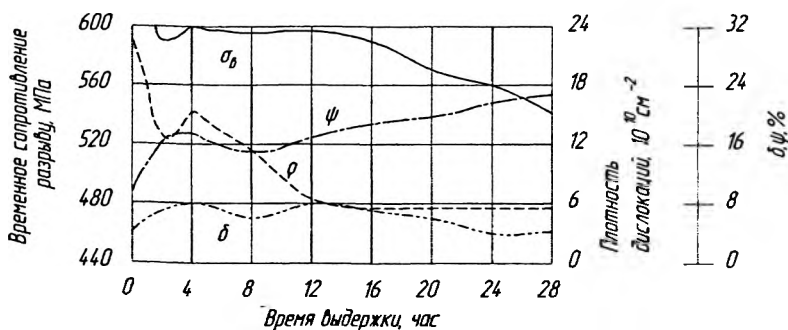


Рисунок 3 – Свойства сплава Д16Т после старения при $175 \text{ }^\circ\text{C}$

Однако в отличие от обычной схемы обработки дюралюминия (закалка + искусственное старение) абсолютные значения временного сопротивления разрыву значительно выше. По сравнению с ударно-волновой обработкой существенно увеличивается время выдержки, после которого наблюдается снижение σ_b сплава.

Старение сплава Д16 при температуре 200 °С (рисунок 4) приводит к резкому снижению σ_b , связанному как с уменьшением плотности дислокаций, так и с образованием и ростом S и θ -фаз, максимальное значение которых отмечается при $\tau = 2-3$ ч. При увеличении времени выдержки до 10 ч и более происходит стабилизация свойств материала, численные значения которых соответствуют свойствам сплава Д16 после закалки и искусственного старения: $\sigma_b = 470-490$ МПа, $\delta = 4-6$ %.

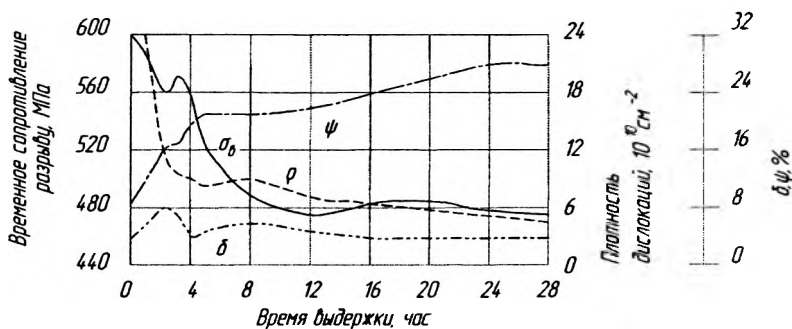


Рисунок 4 – Свойства сплава Д16Т после старения при 200 °С

В целом искусственное старение обработанного взрывом сплава Д16Т не приводит к его охрупчиванию при температурах старения 150–200 °С и выдержках до 30 ч, что объясняется мелкодисперсным характером выделения избыточных интерметаллидных фаз без их коагуляции и нарушения когерентности связей с α -твердым раствором. Это подтверждается постоянным уровнем относительного удлинения при любых режимах старения.

Однако искусственное старение не приводит и к повышению механических свойств, как это наблюдалось при деформационно-

термической и ударно-волновой обработке сплава Д16 [2, 4, 5]. Очевидно, это связано с тем, что процесс выделения избыточных интерметаллидных фаз происходит уже во время высокоскоростной пластической деформации и упрочняющий эффект от их выделения, а также от насыщения структуры материала дефектами кристаллической решетки намного выше, чем при фазовом старении сплава Д16. Искусственное старение обработанного взрывом сплава Д16Т обеспечивает стабилизацию его структуры и механических свойств. При этом оптимальным является старение сплава при 150 °С в течение 4 ч, когда обеспечиваются следующие свойства: $\sigma_b = 580\text{--}600$ МПа, $\delta = 7\text{--}8\%$, $\psi = 14\text{--}16\%$.

Литература

1. **Колачев, Б.А.** *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов* / Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, В.И. Елагин. – М.: Металлургия, 1981. – 414 с.
2. **Фридляндер, И.Н.** *Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы* / И.Н. Фридляндер. – М.: Металлургия, 1979. – 208 с.
3. **Рабинович, М.Х.** *Термомеханическая обработка алюминиевых сплавов* / М.Х. Рабинович. – М.: Машиностроение, 1972. – 160 с.
4. **Лужников, Л.П.** *Деформируемые алюминиевые сплавы для работы при повышенных температурах* / Л.П. Лужников. – М.: Металлургия, 1965. – 290 с.
5. **Беляев, В.И.** *Влияние импульсной и термической обработки на свойства сплава Д16* / В.И. Беляев, И.Л. Бумина // Порошковая металлургия. – 1984. – № 8. – С. 54–56.
6. **Ковалевский, В.Н.** *Деформационно-термическое упрочнение сплава Д16 с использованием энергии взрыва* / В.Н. Ковалевский, Г.М. Сенченко // Порошковая металлургия: достижения и проблемы: сборник докладов международной научно-технической конференции, Минск, 22–23 сентября. – Минск, 2005. – С. 246–249.