

### Библиографические ссылки

1. Зуев М. И. Пластичность стали при высоких температурах / М. И. Зуев, В. С. Култыгин, М. И. Виноград, А. В. Остапенко и др. – М.: Металлургиздат, 1954. – 46 с.
2. Пат. 85254 Україна МПК<sup>7</sup> С22С 35/00 С22С 38/06 С21С 7/04, С21С 7/06. Композиційний розкислювач для обробки сталей / О. М. Шаповалова, В. П. Шаповалов, О. В. Шаповалов, С. О. Полішко; заявник та патентоутримувач: Дніпропетровський національний університет. – № а200700858; заявл. 26.01.2007; опубл. 12.01.2009 // Бюл. № 1.
3. Спиридонов В. С. Химическое модифицирование оксида кремния и гидроксилата бора органическими соединениями / В. С. Спиридонов, П. Г. Мингалев, Г. В. Лисичкин // Вестн. Моск. ун-та. Химия. – 2002. – Т. 43. № 5. – С. 315–316.

*Надійшла до редколегії 02.06.2014 р.*

УДК 669.295.04

**В. П. Пошивалов, А. И. Кузьмицкая, В. С. Жданов**

*Институт технической механики НАНУ и ГКАУ*

### ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ОБРАБОТКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМГ6

Досліджено вплив холодної обробки на фізико-механічні властивості алюмінієвого сплаву типу АМг. Мета – переведення максимального обсягу вторинної фази у стан пересиченого розчину в матриці; при цьому вторинні виділення розподіляються всередині зерна, утворюючи пересичений твердий розчин Mg в Al. Передбачається, що після витримки за температури 330–340 °С структура розплаву модифікується, а в закристалізованому сплаві структурні складові мають рівномірно розподілитися по всьому об'єму. Заключним етапом обробки сплаву є відпуск при 110 °С.

*Ключові слова:* алюмінієвий сплав АМг6, холодна обробка, міцність, пластичність, мікроструктура.

Исследовано влияние холодной обработки на физико-механические свойства алюминиевого сплава типа АМг. Цель – перевод максимального объема вторичной фазы в состояние пересыщенного раствора в матрице; при этом вторичные выделения распределяются внутри зерна, образуя пересыщенный твердый раствор Mg в Al. Предположительно после выдержки при температуре 330–340 °С структура расплава модифицируется, а в закристаллизовавшемся сплаве структурные составляющие равномерно распределяются по всему объему. Заключительный этап обработки сплава – отпуск при 110 °С.

*Ключевые слова:* алюминиевый сплав АМг6, холодная обработка, прочность, пластичность, микроструктура.

The main goal of the study is to investigate the influence of cold treatment on physical and mechanical characteristics of AMg aluminium alloy. This study is focused on movement of the second phase value into supersaturated solid solution in matrix, and to distribute secondary isolations inside of grain, forming supersaturated solid solution of Mg in Al. Assumed that after exposure at this temperature the structure of the solution will be modified, and structural components are uniformly distributed throughout the volume in the crystallized alloy. Final stage of the treatment is tempering at 110 °C.

*Key words:* aluminium alloy AMg6, cold treatment, strength, ductility, microstructure.

**Введение.** В последние годы наряду с различными видами энергетической обработки [7] широко применяется процесс низкотемпературной обработки различных материалов для улучшения их физико-механических свойств.

Изменение механических свойств металлов и сплавов при снижении температуры зависит от вида кристаллической решетки и несовершенства ее строения, размера зерен, включений атомов легирующих элементов, фазового состава сплавов. На прочность и пластичность кристаллических тел особое влияние оказывают число действующих в кристаллической решетке систем скольжения, количество и распределение примесей, упорядоченность дислокационной структуры.

Исследования механических свойств металлов различного кристаллического строения показывают, что охлаждение их образцов ниже 0°С приводит к повышению предела прочности при растяжении и росту модуля упругости [4].

При сохранении пластичности у металлов и сплавов в условиях низких температур растет работа разрушения при динамических нагрузках и сопротивление разрушению материалов при циклических нагрузках. Переход металла в хрупкое состояние при охлаждении связан с изменением характеристик пластичности и уменьшением работы разрушения. Кристаллическое строение металлов с решеткой в форме гранцентрированного куба (ГЦК) допускает развитие значительных пластических деформаций. Число систем скольжения у ГЦК-кристаллов с понижением температуры возрастает, пластическая деформация распределяется равномерно и сопровождается упрочнением; тетрагональные искажения решетки отсутствуют, и температурная зависимость напряжений течения ослаблена. У металлов с гексагональной плотно упакованной кристаллической решеткой пластические деформации ограничены, так как у них работает в основном одна система скольжения [4].

При охлаждении материалов на изменение таких важных характеристик, как пределы прочности, усталости, показатели упругости и пластичности, температурный порог хрупкости, ударная вязкость, дополнительно могут влиять концентрация напряжений, дефекты механической обработки, сварки и коррозионное воздействие рабочей среды. Механические характеристики материала, определенные при испытаниях образцов, нельзя считать константами, так как их величины связаны в определенной мере с условиями нагружения, с формой и размерами образца. Только комплексная оценка и учет всех факторов могут позволить более полно оценить влияние холода на свойства конструкционных материалов. Возможность хрупкого разрушения определяется составом и структурой металла, особенностями нагружения и местной концентрацией напряжений, наличием трещин, раковин, надразов и царапин. Хрупкое разрушение происходит внезапно при напряжениях, которые могут быть меньше предела текучести; поэтому помимо удовлетворительных прочностных свойств материалы должны иметь удовлетворительную пластичность [4].

На поведение металлов и сплавов при охлаждении влияют также размер зерен в поликристаллите и их ориентация по отношению к приложенному напряжению. При увеличении размеров зерна ухудшаются пластические свойства. Усложнение напряженного состояния, увеличение его неоднородности обычно способствуют переходу металла из пластичного состояния в хрупкое [4].

**Постановка задачи.** Целью данной работы является исследование влияния холодной обработки на физико-механические свойства алюминиевого сплава типа АМг.

Многие алюминиевые сплавы обладают хорошей вязкостью как при низких, так и при высоких температурах. Особенностью алюминиевых сплавов по сравнению со сталями является отсутствие у них перехода от вязкого состояния к хрупкому при низких температурах.

Следует различать пластичность и вязкость металла. Пластичность определяют как способность материала подвергаться деформации, приводящей к необратимому остаточному изменению его первоначальной формы без микроскопического разрушения. Вязкость – это свойство металла поглощать в заметных коли-

чествах, не разрушаясь, механическую энергию. Вязкость определяется величиной работы внешних сил, затрачиваемой на упругую и на пластическую части общей деформации. Пластичные металлы, такие как алюминий, могут иметь малую вязкость при высоком относительном удлинении.

Температура, соответствующая переходу металлов из пластического в хрупкое состояние, называется критической температурой; она характеризует порог хладноломкости. Так как переход из пластического состояния в хрупкое для большинства металлов и сплавов происходит в некотором диапазоне температур, то различают два порога хладноломкости: верхний – соответствующий переходу из пластического состояния в промежуточное, и нижний – соответствующий переходу из промежуточного состояния в хрупкое.

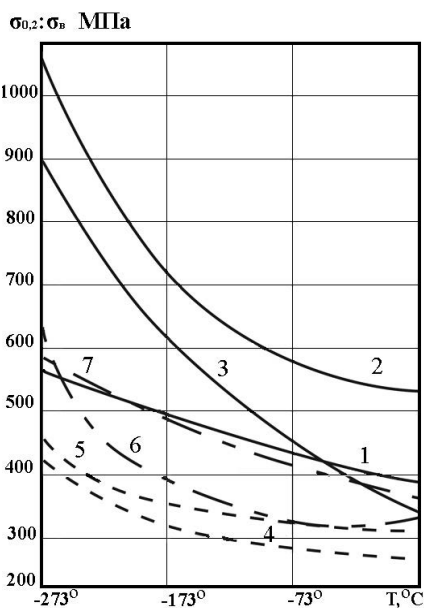
Прочность материалов при многократных нагружениях характеризуется пределом усталости. Его изменения у некоторых металлов, при их охлаждении, показаны на рис. 1. Из рис. 1 следует, что, хотя предел усталости у многих металлов при снижении температуры возрастает, однако при этом увеличивается опасность перехода от усталостного к хрупкому разрушению при возникновении первых небольших трещин.

Общей закономерностью для исследованных сплавов является повышение временного сопротивления при снижении температуры от  $20^{\circ}\text{C}$  до  $-269^{\circ}\text{C}$  в 3–4 раза у малолегированных сплавов системы Al–Mg и Al–Cu.

Механические свойства промышленных термически не упрочняемых алюминиевых сплавов в интервале температур от  $20^{\circ}\text{C}$  до  $-269^{\circ}\text{C}$  изменяются аналогично чистому алюминию: с понижением температуры временное сопротивление увеличивается, предел текучести меняется незначительно, отношение  $\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_B}$  снижается, относительное удлинение повышается при охлаждении сплавов до температуры  $-196^{\circ}\text{C}$ , а затем снижается [8].

**Материалы и методы исследования.** В работе [11] исследовалось влияние криогенной обработки на параметры остаточного напряжения и механические свойства алюминиевого сплава 7075–T651, применяемого в аэрокосмической отрасли. Образцы медленно охлаждались до температуры  $-89^{\circ}\text{C}$ , выдерживались 24 часа, а затем медленно нагревались до комнатной температуры. Было обнаружено, что после обработки изменились параметры остаточного напряжения, а также значительно улучшились параметры коррозионного растрескивания. В то же время менее значительные улучшения наблюдались в параметрах усталости и прочности.

Кроме того, в работе [11] изучалось влияние криогенной обработки на предел пропорциональности, предел текучести, предел прочности, удлинения, испытание на удар по Шарпи сплава 7075–T651 при комнатной температуре. Образцы помещали в криогенную печь на 2 и 48 часов при температуре  $-196^{\circ}\text{C}$ .



**Рис. 1.** Зависимость предела усталости  $\sigma_{0,2}$  от температуры: 1 – сталь 12X18H10T; 2 – сталь 7X16H6; 3 – сталь 03X20H16AG6; 4 – алюминиевый сплав АМг6; 5 – алюминиевый сплав Д20; 6 – титановый сплав АТ2; 7 – титановый сплав ВТ-5

Влияние криогенной обработки на стандартные механические свойства оказалось незначительным и составило 1% разницы при 48-часовой выдержке. Максимальное улучшение было зафиксировано при испытании на удар по Шарпи – 12% разницы при 48-часовой выдержке. При этом не было зафиксировано изменений в свойствах между исходным образцом и обработанным с выдержкой 2 часа.

Исследования [9] по влиянию низких температур на свойства таких металлов, как алюминий и его сплавы, то есть металлы с гранцентрированной кубической решеткой, показали, что при понижении температуры в испытании наблюдается небольшое, постепенное, непрерывное повышение начального сопротивления пластической деформации – предела текучести и модуля упругости. Пластичность меняется незначительно. Наблюдается существенное повышение предела прочности при снижении температуры, что указывает на значительную степень зависимости упрочнения от температуры. Также при снижении температуры снижается вязкость, что можно объяснить количеством и размером интерметаллических соединений в структуре сплава. Считается, что более высокое содержание легирующих элементов в сплаве приводит к созданию более искаженной или напряженной кристаллической решетки и снижению сопротивления хрупкому разрушению при криогенных температурах.

Склонность к хрупкому разрушению алюминиевых сплавов зависит от количества и размера интерметаллических соединений в сплаве и от степени искаженности или напряжения кристаллической решетки. Поэтому на получение оптимальных свойств влияют технология изготовления и химический состав материала [1].

Устойчивость переохлажденного твердого раствора зависит от природы основы сплава и системы легирования, содержания легирующих элементов и структуры сплава перед закалкой. В сплавах на разной основе и с разными легирующими элементами при одной основе различна диффузионная подвижность атомов. Работа образования критического зародыша зависит от поверхностной энергии на границе матрицы, выделения энергии и упругой деформации, возникающей из-за различия в удельных объемах фаз [3].

С увеличением степени переохлаждения уменьшаются размер критического зародыша и работа его образования. Следовательно, чем больше степень переохлаждения, тем меньшая по уровню энергии и геометрическим размерам требуется флуктуация, на базе которой образуется критический зародыш, и тем больше число таких флуктуаций. Поэтому с ростом степени переохлаждения увеличивается число критических зародышей, возникающих в единицу времени в единице объема в результате флуктуаций энергии. Их число должно быть пропорционально фактору

$$\exp\left(\frac{-\Delta F_{KP}}{kT}\right),$$

где  $\Delta F_{KP}$  – работа образования критического зародыша;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура.

Критический зародыш становится центром кристаллизации только тогда, когда он присоединяет к себе один или несколько атомов от материнской фазы.

Частота присоединения атомов к зародышу пропорциональна фактору  $\exp\left(\frac{-Q}{kT}\right)$ ,

где  $Q$  – энергия активации перехода атома через границу раздела фаз. Следовательно, скорость зарождения центров кристаллизации, зависящую от вероятности образования определенных энергетических флуктуаций и вероятности присоединения атомов к критическим зародышам, можно представить следующим выражением [6]:

$$J = A_e \frac{-\Delta F_{kp}}{kT} \frac{-Q}{e^{kT}}, \quad (1)$$

где  $J$  – скорость зарождения центров кристаллизации,  $\Delta F_{kp}$  – работа образования критического зародыша;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура;  $Q$  – энергия активации перехода атома через границу раздела фаз.

Поскольку составы  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз различны, то выделение  $\beta$ -фазы связано с диффузионным перераспределением компонентов. При достаточно быстром охлаждении диффузионное перераспределение, необходимое для зарождения и роста кристаллов  $\beta$ -фазы, не успевает пройти и  $\beta$ -фаза не выделяется из  $\alpha$ -раствора. После такой термообработки сплав при комнатной температуре состоит из одной  $\alpha$ -фазы, как и при температуре нагрева. Таким образом, закалка без полиморфного превращения состоит в фиксации при более низкой температуре состояния, свойственного более высокой температуре.

На рис. 2 представлена диаграмма состояния двухкомпонентного сплава [5], из которой видно, что при закалке без полиморфного превращения образуется пересыщенный твердый раствор.

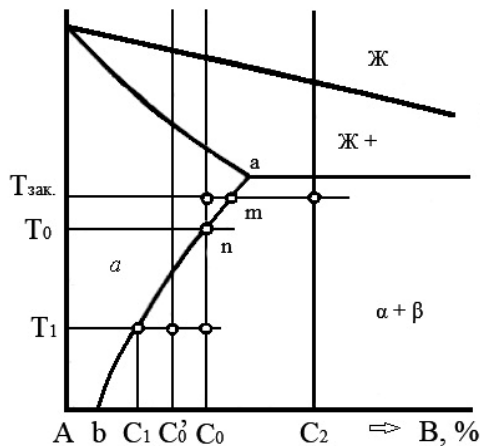


Рис. 2. Диаграмма состояния двухкомпонентного сплава

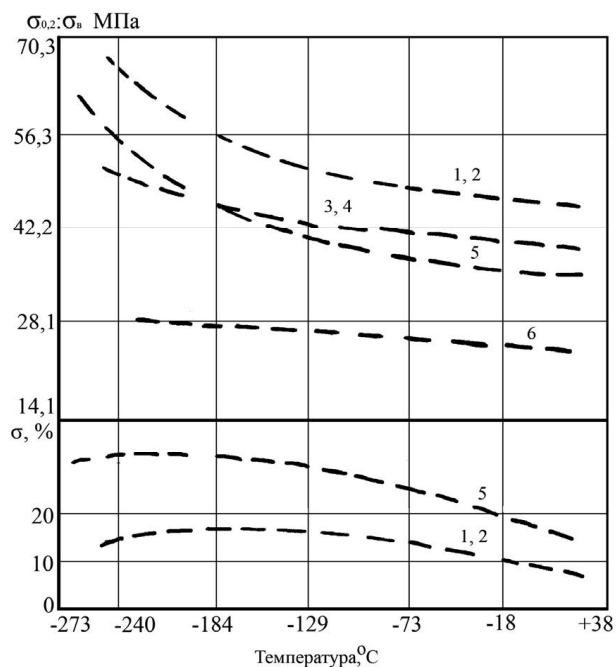
Такая закалка к чистым металлам принципиально неприменима. Рассмотренную на примере сплава  $C_0$  закалку без полиморфного превращения широко применяют к алюминиевым, магниевым, никелевым, медным и другим сплавам, а также к некоторым легированным сталям.

**При быстром охлаждении**  $\beta$ -фаза не успевает выделиться из  $\alpha$ -раствора, и его состав при комнатной температуре, так же как и при температуре закалки, определяется точкой  $m$  [6].

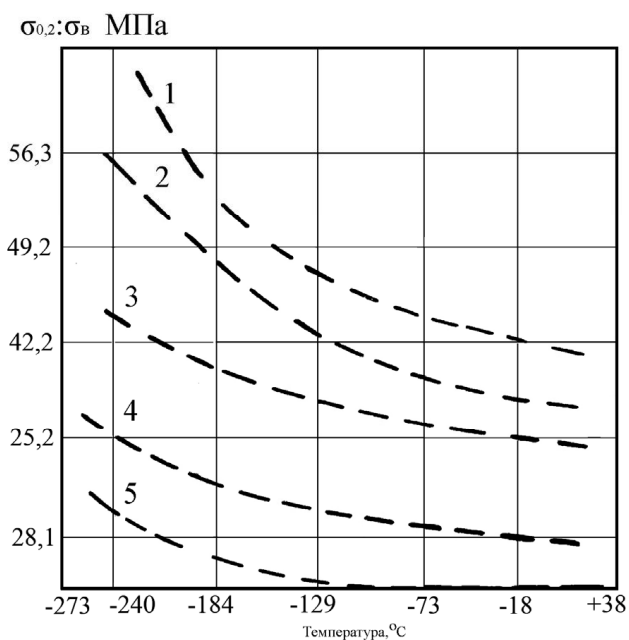
Характерные свойства сплавов серии 5000, представленных сплавами марок 5083 (АМг4) и 5456 (АМг6), показаны на рис. 3 и 4, построенных по данным работ [12] и [10]. Листы сплава 5083 в состоянии Н38 (высокая степень нагартовки, стабилизированный) имеют относительно высокий уровень механических свойств как для сплава, не упрочняемого термической обработкой.

Из рис. 3 видно, что сплав 5083-Н113 имеет значительно более низкий уровень предела прочности, чем 5083-Н38. Значения при криогенных температурах вдвое больше, чем при комнатной температуре [1].

На рис. 5,а приведена структура сплава АМг6 в исходном состоянии, которая отмечается зернистым строением материала с многочисленными включениями второй фазы как по границам, так и равномерно распределенными в матрице зерна. Дислокационная картина в виде ямок травления, которые идентифици-



**Рис. 3. Механические свойства листов и плит сплава 5083 при низких температурах [1]: 1,2 –  $\sigma_B$ ,  $\delta$  – лист Н38 (продольное, поперечное); 3,4 –  $\sigma_{0.2}$  лист Н38 (продольное, поперечное); 5 –  $\sigma_B$ ,  $\delta$  – плита Н113 (продольное); 6 –  $\sigma_{0.2}$  – плита Н113 (продольное)**



**Рис. 4. Механические свойства листов и плит сплава 5456 при низких температурах [1]: 1,2 –  $\sigma_B$  лист (продольное, поперечное); 3,4 –  $\sigma_{0.2}$  лист (продольное, поперечное); 5 –  $\sigma_{0.2}$  плита (продольное)**



руються як виходи дислокацій на поверхню, доволно однородна (рис. 5, b). Електронно-мікроскопічні дослідження ілюструють практично прямі лінії сколюження і частини другої фази (рис. 5, c).

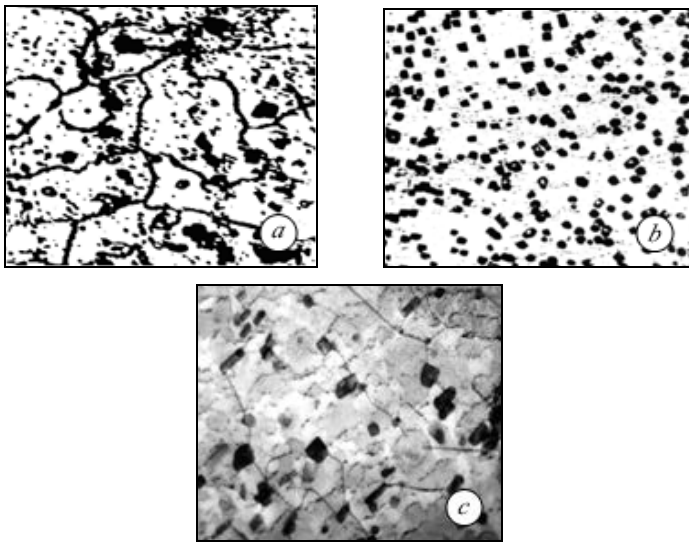


Рис. 5. Структура сплаву АМг6 в исходному стані: а, б, с

Вторинна  $\beta$ -фаза  $Al_3Mg_2$  в сплаві АМг6 являється більш хрупкою і твердою, ніж матриця алюмінію; друга фаза утворює неперервний шар по границях зерен. Якщо дана фаза буде рівномірно дисперсійно розподілена всередині зерна, то буде досягнуто помітне упрочнення з збереженням необхідної пластичності.

В роботі [2] було відзначено, що коли кількість  $\beta$ -фази досягає приблизно 30%,  $\alpha$ -фаза перестає бути неперервною матрицею і  $\alpha$ -кристали починають оточуватися  $\beta$ -кристалами.

З швидкістю охолодження при порівняльній невеличкій швидкості,  $10^2 - 10^4$  град/с, оптичний аналіз показав структуру  $\alpha$ -твердого розчину, по границям якого були розподілені вторинні виділення  $\beta$ -фази ( $Al_3Mg_2$ ).

З двохкомпонентної діаграми стану системи Al-Mg, зображеної на рис. 6, видно, що нагрів АМг6 до температури 330 – 340°C сплав перейде в стан пересиченого твердого розчину Mg в Al.

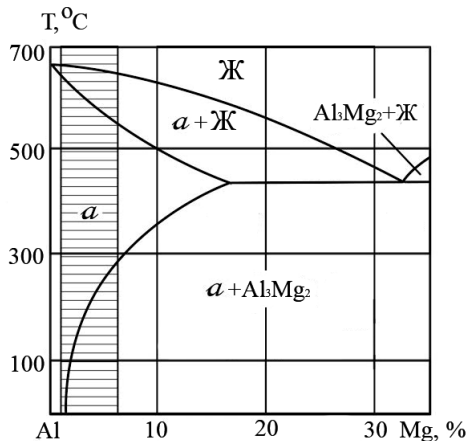


Рис. 6. Двухкомпонентная диаграмма состояния системы Al-Mg

В данной работе основной целью является перевод максимального объема вторичной фазы в состояние пересыщенного раствора в матрице и распределение вторичных выделений внутри зерна.

Предполагается, что после выдержки при данной температуре структура расплава модифицируется, а в закристаллизовавшемся сплаве структурные составляющие окажутся равномерно распределенными по всему объему. С увеличением скорости охлаждения данный эффект усиливается. В быстрозакристаллизованных сплавах ( $10^4$  град/с) предполагается отсутствие  $\beta$ -фазы или появление вторичных выделений, представляющих собой пересыщенный твердый раствор Mg в Al.

При высоких скоростях охлаждения, после обработки холодом, возникают внутренние напряжения, которые могут привести к короблению и растрескиванию. Поэтому заключительным этапом обработки сплава является отпуск. Его цель состоит в повышении вязкости и пластичности, уменьшении внутренних напряжений и более равномерном распределении вторичных выделений. Для алюминиево-магниевого сплава АМг6 можно выбирать низкотемпературный отпуск при 110 °С.

**Выводы.** Для повышения показателей прочности и долговечности алюминиевого сплава АМг6 предлагается использовать метод быстрого охлаждения материала, в том числе и до криогенных температур.

В работе представлено теоретическое обоснование изменения прочностных свойств сплава АМг6 при криогенной обработке после высокотемпературного нагрева. Приведены результаты такого воздействия на механические и структурные свойства алюминиевых сплавов, близких по составу к АМг6, и установлена тенденция в изменениях соответствующих прочностных характеристик.

Определена целесообразность проведения низкотемпературной обработки сплавов в зависимости от типа кристаллической решетки, наличия легирующих элементов и способа получения заготовки. Для некоторых сплавов оценивается величина эффекта в зависимости от времени воздействия. Обосновано применение такого подхода к обработке сплава АМг6 для повышения соответствующих прочностных характеристик.

### Библиографические ссылки

1. Алюминиевые сплавы при низких температурах / под ред. И. Н. Фридляндера. – М. : Металлургия, 1967. – 296 с.
2. **Бернштейн М. Л.** Механические свойства металлов / М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский. – М. : Металлургия, 1979. – 495 с.
3. **Ватолин Н. А.** Влияние ближнего порядка жидких сплавов Al–Mg и Al–Si на структуру и свойства в кристаллическом состоянии / Н. А. Ватолин, Э. А. Пастухов, В. Н. Сермягин. – М. : Наука, 1986. – 304 с.
4. **Клименко А. П.** Холод в машиностроении / А. П. Клименко, Н. В. Новиков, Б. Л. Смоленский, В. И. Могильный и др. – М. : Машиностроение, 1977. – 192 с.
5. **Лахтин Ю. М.** Металловедение и термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин. – М. : Металлургия, 1969. – 448 с.
6. **Новиков И. И.** Теория термической обработки металлов / И. И. Новиков – М. : Металлургия, 1978. – 391 с.
7. **Пошивалов В. П.** Підвищення довговічності сплаву АМг6М за рахунок енергетичної обробки в умовах повзучості / В. П. Пошивалов, Д. Г. Борщевська, В. Д. Рябчій, І. І. Телегіна // ФМММ. – 2013. – № 6. – С. 62–69.
8. **Фридляндер И. Н.** Алюминиевые деформированные конструкционные сплавы / И. Н. Фридляндер. – М. : Металлургия, 1979. – 208 с.
9. **Христиан Дж. Л.** Механические свойства некоторых алюминиевых сплавов серии 5000 при криогенных температурах / Дж. Л. Христиан, Дж. Ф. Уотсон. – М. : Металлургия, 1967. – С. 57–68.



10. **Kaufman J. G.** Advances in cryogenic engineering / J. G. Kaufman, E. W. Jonson. – NY : Plenum press, 1961. – P. 637–649.
11. **Pavan K. M.** Effect Of Cryogenic Treatment On The Mechanical And Microstructural Properties Of Aluminium Alloys / K. M. Pavan, L. S. Sachin, S. Mayur, A. Chandrashekar, B. S. Ajaykumar // International Journ. of Mechanical And Production Engineering. – May 2014. – Vol.2, Issue 5.
12. **Rise L. P.** Advances in cryogenic engineering / L. P. Rise. – NY : Plenum press, 1962. – P. 671–677.

*Надішла до редколегії 01.10.2014 р.*

УДК 629.76 (075.8)

**Ю. А. Ромасько, Ю. Д. Шептун**

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

### **СИНТЕЗ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ**

Йдеться про актуальність проблеми розробки значних за розмірами космічних конструкцій (сонячні електростанції, антени, телескопи тощо), про необхідність кутової орієнтації космічних конструкцій (КК) у просторі. Великі розміри, мала жорсткість КК обумовлюють виникнення пружних коливань конструкцій, наявність яких ускладнює забезпечення сталого керованого руху КК. Згадані конструкції як об'єкти керування можуть бути за своїми властивостями і структурою нестійкими щодо руху. Показано можливість ліквідації зазначеної нестійкості шляхом використання коригуючих зв'язків.

*Ключові слова:* об'єкт регулювання, нестійкість руху, коректуючи зв'язки.

Затронута актуальная проблема разработки значительных по размеру космических конструкций (солнечные электростанции, антенны, телескопы и др.), подчеркивается необходимость угловой ориентации космических конструкций (КК) в пространстве. Большие размеры, малая жёсткость КК обуславливают возникновение упругих колебаний конструкции, затрудняющих обеспечение устойчивого управляемого движения КК. Данные конструкции как объекты регулирования могут быть по своим свойствам и структуре неустойчивыми. Показана возможность устранения собственной и структурной неустойчивости объекта регулирования путем использования корректирующих связей.

*Ключевые слова:* объект управления, неустойчивость движения, корректирующие связи.

The problem of development significant on the size of space designs (solar power stations, aeriels, telescopes, etc.) is actual. As a rule, there is a necessity of angular orientation of space designs (SD) for space. The big sizes, small rigidity SD cause occurrence of elastic fluctuations of the design complicating maintenance of steady controlled movement SD. The named designs as objects of regulation can be actually and structurally unstable the opportunity of elimination of own and structural instability of object of regulation is below shown by use of adjusting communications (connections).

*Key words:* object of control, instability the movements adjusting communications (connections).

**Введение.** Математическая модель космической конструкции как объекта регулирования (ОР) принимается в виде