



Макаренко Д. Н.

## УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ КОМПОЗИЦИОННОГО СПЛАВА ТИПА СПЕЧЕННЫЙ АЛЮМИНИЕВЫЙ ПОРОШОК (САП)

В статье представлен анализ состава и свойств различных дисперсно-упрочненных композиционных материалов на основе алюминия, применяемых при производстве аэрокосмической техники. Проведен анализ свойств данных материалов для обеспечения управления их качеством. Построены математические модели зависимости параметров САП от содержания оксида алюминия и температуры.

**Ключевые слова:** композиционный материал, дисперсно-упрочненный, алюминий, математическая модель, предел текучести, предел прочности.

### 1. Введение

Композиционные материалы (КМ) довольно часто используются в технике. Их применение очень важно для таких отраслей промышленности как автомобилестроение, авиация, производство космической техники, гражданское строительство и т. д. На данный момент в общем случае существует 2 вида композиционных материалов, применяемых для этих целей:

- 1) КМ с металлической матрицей;
- 2) КМ с неметаллической матрицей.

Наиболее используемыми КМ с неметаллической матрицей являются полимерные карбо-волокониты, боро-волокониты и органо-волокониты [1]. Из них изготавливаются различные детали авиационной техники – шасси, подшипники, диски авиационных тормозов и т. д.

Что же касается КМ с металлической матрицей, то они изготавливаются на основе различных металлов: алюминия, бериллия, магния, никеля, кобальта, хрома и т. д. Такие материалы называют дисперсно-упрочненными композиционными материалами (ДУКМ) [2]. ДУКМ принадлежат к группе композиционных материалов, которые сделаны, главным образом, методами порошковой металлургии. Микроструктура ДУКМ состоит из поликристаллических матриц, в которых диспергированы частицы (в основном оксиды, карбиды и/или нитриды) [3]. Их особенностью является то, что матрица из металла или сплава упрочняется мелко-дисперсными искусственно введенными частицами, имеющими размер до 0,1 мкм в количестве от 0,1 до 15 %. В качестве упрочняющей фазы используются дисперсные частицы оксидов, карбиды, нитриды и другие тугоплавкие соединения.

После формирования и спекания для получения композитного материала проводится горячая пластическая деформация, в результате чего получается плотный полуфабрикат, не имеющий пор (ленты, полосы, профиля).

Данное исследование посвящено ДУКМ на основе алюминия. Такие материалы применяются, например, для обшивки гондол силовых установок в зоне выхлопа, штоки поршней, лопадки компрессоров и т. д.

### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Наиболее широко в качестве соединений, применяемых как упрочняющая фаза в ДКМ на основе алюминия и его сплавов, используются оксиды. На данный момент существует 3 марки ДКМ на основе алюминия: САП-1, САП-2 и САП-3. Отличие данных материалов друг от друга состоит в отличии по концентрации оксидов (от 6 % до 9 %  $Al_2O_3$  для САП-1, от 9 % до 13 %  $Al_2O_3$  для САП-2, от 13 % до 17 %  $Al_2O_3$  для САП-3) [4]. Также в их состав входят до 25 % кремния и до 5 % железа. Кроме САП существуют и ДКМ Al-C. В таких материалах роль упрочняющей фазы выполняет карбид алюминия  $Al_4C_3$  [5]. С увеличением содержания  $Al_2O_3$  в САП в общем случае происходит повышение твердости и прочности и снижение пластичности, коэффициента термического расширения, тепло- и электропроводности. Данные материалы имеют высокую коррозионную стойкость, не подвергаются коррозии под напряжением и межкристаллитной коррозии, а также имеют высокую радиационную стойкость [6–10].

Исследованиями установлено, что при температурах 300–500 °С ДКМ на основе алюминия превосходят по прочности все промышленные алюминиевые сплавы и отличаются высокими характеристиками по прочности и ползучести [4].

Поставка ДУКМ на основе алюминия осуществляется в различном виде: листы, профили, полосы, прутки, штамповки, проволоки и др.

До этого времени задача определения параметров ДКМ на основе алюминия и моделирования их свойств для управления качеством в процессе создания, эксплуатации и утилизации в полной мере не была отражена в исследованиях. Исследование параметров ДКМ на основе алюминия позволит выделить их основные значимые параметры, дать оценку того, начиная с каких значений исследуемые параметры будут оказывать существенное влияние на требования, предъявляемые к ним, что позволит оптимизировать состав данных материалов с точки зрения как эксплуатации, так и последующей их утилизации.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью проведенных исследований являлся анализ свойств и состава дисперсно-упрочненных композиционных материалов на основе алюминия, применяемых как в производстве аэрокосмической техники (АКТ), так и в других отраслях промышленности, а также подбор оптимальных параметров данных материалов для обеспечения определения параметров качества, применяемых к ним.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработка математической модели для определения связи химического состава и свойств ДКМ на основе алюминия;
- проведение анализа и выявление возможности уточнения требований, предъявляемых к составу и свойствам ДКМ на основе алюминия, для обеспечения управления их качеством.

### 4. Методика исследования параметров ДКМ на основе алюминия

Таблица экспериментального материала была выбрана на основании работы [5] (табл. 1).

Таблица 1

Механические свойства ДКМ на основе алюминия

Материал	<i>t</i> , °С	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
САП-1	20	200	290–310	7–9
	250	—	180–190	4–6
	350	—	140–150	3–4
	500	—	100	2
САП-2	20	230	320	4
	250	—	190	3
	350	—	150	2
	500	—	100	1
САП-3	20	340	400	3
	250	—	240	1,5
	350	—	190	1
	500	—	130	1

**Примечание:** *t* — температура испытания образца;  $\sigma_{0,2}$  — предел текучести;  $\sigma_b$  — предел прочности;  $\delta$  — относительное удлинение

Анализируя полученные данные, можно заметить, что предоставляется возможным применение плана полного факторного эксперимента и определение значений выходных и входных переменных, принимая во внимание то, что число экспериментов соответствует  $N = 2^k$ . Модель была получена на основании метода построения полного ортогонального центрального композиционного плана второго порядка [11, 12]. Нормирование значений входных переменных проводилось по следующим формулам:

$$x_1 = \frac{x_1^* - \bar{x}_1}{I_1}, \tag{1}$$

$$x_2 = \frac{x_2^* - \bar{x}_2}{I_2}, \tag{2}$$

где  $x_1$  и  $x_2$  — нормированные значения входных переменных,  $x_1^*$ ,  $x_2^*$  — натуральные значения входных переменных,  $\bar{x}_1$ ,  $\bar{x}_2$  — средние значения входных переменных  $\bar{x}_1 = 11\%$ ,  $\bar{x}_2 = 260$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  — интервалы варьирования входных переменных ( $I_1 = 4$ ,  $I_2 = 240$ ).

Математическую модель можно представить полиномом следующего вида:

$$Y_i = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3(x_1^2 - \beta) + a_4(x_2^2 - \beta) + a_5x_1x_2, \tag{3}$$

где  $a_i$  — оцениваемые коэффициенты,  $\beta$  — параметр, который рассчитывается в зависимости от числа точек ядра композиционного плана  $2^n - p$ , плеча «звездных» точек  $\alpha$  и числа точек плана по формуле:

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^N (x_j^i)^2}{N} = \frac{2^{n-p} + \alpha}{N}. \tag{4}$$

Общий вид данных, необходимых для построения центрального ортогонального композиционного плана, приведен в табл. 2.

Таблица 2

Представление данных для построения центрального ортогонального композиционного плана

№ эксперимента	$x_1$	$x_2$	$x_1^2 - \beta$	$x_2^2 - \beta$	$Y_{ij}$
1	$x_1^{\max}$	$x_2^{\max}$	$x_1^{\max} - 0,6667$	$x_2^{\max} - 0,6667$	$Y_{i1}$
2	$x_1^{\min}$	$x_2^{\max}$	$x_1^{\min} - 0,6667$	$x_2^{\max} - 0,6667$	$Y_{i2}$
3	$x_1^{\max}$	$x_2^{\min}$	$x_1^{\max} - 0,6667$	$x_2^{\min} - 0,6667$	$Y_{i3}$
4	$x_1^{\min}$	$x_2^{\min}$	$x_1^{\min} - 0,6667$	$x_2^{\min} - 0,6667$	$Y_{i4}$
5	$x_1^{\max}$	... $x_2^{\text{среднее}}$ ...	$x_1^{\max} - 0,6667$	$x_2^{\text{среднее}} - 0,6667$	$Y_{i5}$
6	$x_1^{\min}$	$x_2^{\text{среднее}}$	$x_1^{\min} - 0,6667$	$x_2^{\text{среднее}} - 0,6667$	$Y_{i6}$
7	$x_1^{\text{среднее}}$	$x_2^{\max}$	$x_1^{\text{среднее}} - 0,6667$	$x_2^{\max} - 0,6667$	$Y_{i7}$
8	$x_1^{\text{среднее}}$	$x_2^{\min}$	$x_1^{\text{среднее}} - 0,6667$	$x_2^{\min} - 0,6667$	$Y_{i8}$
9	$x_1^{\text{среднее}}$	$x_2^{\text{среднее}}$	$x_1^{\text{среднее}} - 0,6667$	$x_2^{\text{среднее}} - 0,6667$	$Y_{i9}$

Коэффициенты  $a_i$  определены по следующим формулам:

$$a_i = c_1 \sum_{j=1}^N x^j y^j, \quad i = 1, \dots, n, \tag{5}$$

$$a_i = c_2 [(x_{i-n}^j)^2 - \beta] y^j, \quad i = n + 1, \dots, 2n, \tag{6}$$

$$a_i = c_3 \sum_{j=1}^N x_\mu^j x_\lambda^j y^j, \quad i = 1, \dots, n, \quad \mu \neq \lambda, \quad i = 2n + 1, \dots, k, \tag{7}$$

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y^j - \beta \sum_{j=1}^N a_{n+i}. \tag{8}$$

В формулах (5)–(8)  $c_1, c_2, c_3$  – коэффициенты для линейных, квадратичных и парных взаимодействий независимых переменных соответственно,  $n$  – число линейных членов модели,  $N$  – число экспериментов.

Для полинома второй степени вида (4) значения указанных параметров приведены в табл. 3.

Для оценки точности полученной модели производилось вычисление суммы квадратов отклонений экспериментальных значений выходных переменных от расчетных, полученных по модели ( $S_R$ ) и оценки дисперсий ( $S_R^2$ ):

$$S_R = (y_{\text{эсп}} - y_{\text{расч}})^2, \quad (9)$$

$$S_R = \frac{S_R^2}{\varphi}, \quad (10)$$

где  $\varphi = N - (k + 1)$  – число степеней свободы,  $N$  – число экспериментов ( $N = 9$ ),  $k$  – число оцениваемых параметров ( $k = 5$ ).

Таблица 3

Значения параметров для расчета коэффициентов математической модели

$N$	$\beta$	$C_1$	$C_2$	$C_3$
9	0,6667	0,1667	0,5	0,25

Оценка значимости коэффициентов модели проводилась на основе использования  $t_{\text{кр}}$  – критерия Стьюдента:

$$|a_i| \geq t_{\text{кр}} S_i, \quad (11)$$

где  $t_{\text{кр}}$  – критическое значение распределения Стьюдента для доверительной вероятности 95 % и числа степеней свободы  $\varphi = 3$ ,  $S$  – среднее квадратическое отклонение, определяемое из формулы (10).

## 5. Результаты исследования параметров ДКМ на основе алюминия и их обсуждение

В качестве входных параметров были выбраны содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в различных видах САП ( $x_1$ ), а также температура испытания образцов  $t$  ( $x_2$ ). Содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  для каждого конкретного вида САП бралось по среднему значению – 7 % для САП-1, 11 % для САП-2 и 15 % для САП-3. В качестве выходных параметров были взяты такие параметры как предел прочности  $\sigma_b$  ( $y_1$ ) и относительное удлинение  $\delta$  ( $y_2$ ).

Также учитывая отсутствие экспериментальных данных для значения  $x_1^{\text{среднее}}$ , величина данного параметра была определена по ближайшей известной величине ( $t = 250$  °С), что лежит в пределах погрешности 7 %. Данная погрешность в условиях поставленной задачи не является значимой.

**5.1. Определение влияния предела прочности при увеличении температуры.** Как можно увидеть в экспериментальных данных, в общем случае при увеличении температуры значение предела прочности ( $\sigma_b$ ) уменьша-

ется. Определим, начиная с какого значения температуры ( $t$ ), данное влияние приобретает необратимый характер.

Подставляя данные в (3), была получена математическая модель, описывающая влияние содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в различных видах САП и температуры испытания образцов на значение предела прочности. Данная модель имеет следующий вид:

$$y_1 = 210,1435 + 27,055x_1 - 131,693x_2 - 4,275x_1x_2 + 33,225x_1^2 - 12,5x_2^2. \quad (12)$$

В табл. 4 приведены результаты расчетов нижней и верхней границы интервалов, позволяющих оценить значимость коэффициентов модели.

Таблица 4

Результаты расчетов нижней и верхней границы интервалов, позволяющих оценить значимость коэффициентов модели

Значения отклонений $t_{\text{кр}} S_i$		
Для линейных коэффициентов	Для квадратичных коэффициентов	Для коэффициентов при парном взаимодействии
52,78982	91,4255	64,64759

Сравнение численных значений оценок коэффициентов и значений, приведенных в табл. 4, позволяют сделать вывод о том, что в данной модели незначимыми коэффициентами являются коэффициенты при квадратичном взаимодействии, парном взаимодействии и коэффициент при значении  $x_1$ . Таким образом, математическую модель можно представить в виде:

$$y_1 = 210,1435 - 131,693x_2. \quad (13)$$

После проведенного уточнения математической модели можно сделать вывод о том, что фактор «содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$ » в различных видах САП не оказывает существенного влияния на значение предела прочности ( $\sigma_b$ ).

Поверхность отклика, описывающая значения предела прочности ( $\sigma_b$ ) при различных значениях температуры испытания образцов ( $t$ ) и содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в различных видах САП (%) в выбранной области планирования приведена на рис. 1.

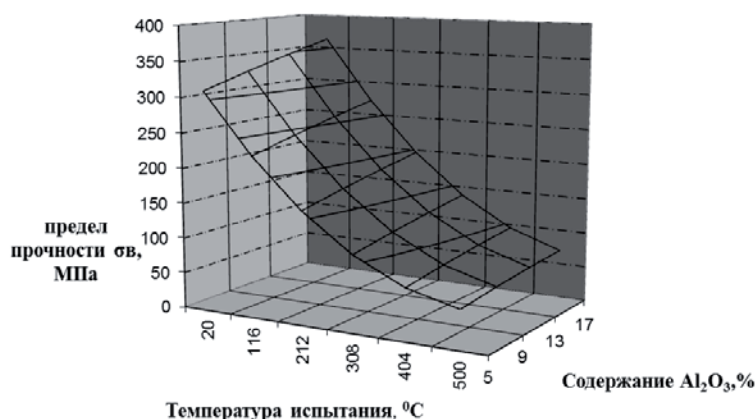


Рис. 1. Поверхность отклика, описывающая значения предела прочности ( $\sigma_b$ ) при различных значениях температуры испытания образцов ( $t$ ) и содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в различных видах САП (%) в выбранной области планирования

Визуальный анализ поверхности отклика позволяет подтвердить вывод о том, что содержание  $Al_2O_3$  не оказывает существенного влияния на предел прочности и в математической модели существенной будет лишь температура испытания образцов. Анализируя полученную поверхность отклика, можно сделать вывод о том, что с увеличением температуры испытания образца САП происходит уменьшение значения предела прочности, что подтверждает имеющиеся экспериментальные данные.

**5.2. Определение влияния относительного удлинения при увеличении температуры.** Как можно увидеть в экспериментальных данных, в общем случае при увеличении температуры значение относительного удлинения ( $\delta$ ) уменьшается. Определим, начиная с какого значения температуры ( $t$ ) данное влияние приобретает необратимый характер.

Подставляя данные в (3), была получена математическая модель, описывающая влияние содержания  $Al_2O_3$  в различных видах САП и температуры испытания образцов на значение относительного удлинения. Данная модель имеет следующий вид:

$$y_2 = 2,73 - 1,5835x_1 - 1,8337x_2 + 0,7025x_1x_2 - 0,0475x_1^2 + x_2^2. \quad (14)$$

В табл. 5 приведены результаты расчетов нижней и верхней границы интервалов, позволяющих оценить значимость коэффициентов модели.

**Таблица 5**

Результаты расчетов нижней и верхней границы интервалов, позволяющих оценить значимость коэффициентов модели

Значения отклонений $t_{кр} S_i$		
Для линейных коэффициентов	Для квадратичных коэффициентов	Для коэффициентов при парном взаимодействии
1,160357	2,009597	1,421

Сравнение численных значений оценок коэффициентов и значений, приведенных в табл. 5, позволяют сделать вывод о том, что в данной модели незначимыми коэффициентами являются коэффициенты при квадратичном взаимодействии и парном взаимодействии.

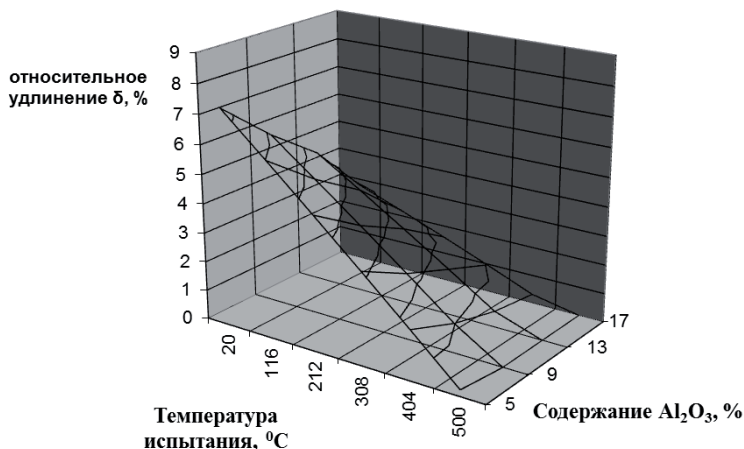
Таким образом, математическую модель можно представить в таком виде:

$$y_2 = 2,73 - 1,5835x_1 - 1,8337x_2. \quad (15)$$

Поверхность отклика, описывающая значения относительного удлинения ( $\delta$ ) при различных значениях температуры испытания образцов ( $t$ ) и содержания  $Al_2O_3$  в различных видах САП (%) в выбранной области планирования, приведена на рис. 2.

Визуальный анализ поверхности отклика позволяет сделать вывод о том, что существенными показателями для определения относительного удлинения образцов САП являются как содержание  $Al_2O_3$ , так и температура

испытания. Анализируя полученную поверхность отклика можно сделать вывод о том, что с увеличением содержания  $Al_2O_3$  в САП происходит уменьшение относительного удлинения образца.



**Рис. 2.** Поверхность отклика, описывающая значения относительного удлинения ( $\delta$ ) при различных значениях температуры испытания образцов ( $t$ ) и содержания  $Al_2O_3$  в различных видах САП (%) в выбранной области планирования

Также с увеличением температуры испытания происходит уменьшение относительного удлинения образца.

## 6. Выводы

В результате проведенных исследований построены математические модели для определения связи химического состава дисперсно-упрочненных композиционных материалов на основе алюминия и температуры их испытания со значениями предела прочности и относительного удлинения для данных материалов. Полученные модели представляют собой уравнения регрессии, оцениваемые параметры которого получены реализацией центрального ортогонального композиционного плана полного факторного эксперимента второго порядка. Анализ данных моделей и полученных поверхностей отклика показал, что предел прочности для ДУКМ на основе алюминия типа САП наиболее зависит от температуры испытания образца (температуры эксплуатации), а содержание  $Al_2O_3$  существенного влияния не оказывает. Что же касается относительного удлинения образцов, то оно практически в равной мере зависит как от температуры испытания (эксплуатации), так и от содержания  $Al_2O_3$ . Установлено, что увеличение значений содержания  $Al_2O_3$  и температуры испытания образцов приводит к уменьшению предела прочности и к уменьшению относительного удлинения ДУКМ на основе алюминия.

Полученные результаты могут быть применены для подбора необходимых материалов в производстве различной техники при известных температурах ее эксплуатации, а также для проведения компромиссной оптимизации исследуемых параметров для управления качеством композиционных сплавов типа САП.

## Литература

1. Brautman, L. J. Composite Materials [Text] / L. J. Brautman, R. H. Krock. — New York: Academic Press, 1975.
2. Лахтин, Ю. М. Материаловедение [Текст]: учебник / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1990. — 528 с.

3. Mendoza-Ruiz, D. C. Dispersion of graphite nanoparticles in a6063 aluminum alloy by mechanical milling and hot extrusion [Text] / D. C. Mendoza-Ruiz, M. A. Esneider-Alcala, I. Estrada-Guel, M. Miki-Yoshida, M. Lpez-Gmez, R. Martinez-Sanchez // Reviews on advanced materials science. — 2008. — Vol. 18. — P. 280–283.
4. Арзамасов, Б. Н. Конструкционные материалы [Текст] / Б. Н. Арзамасов. — М.: Машиностроение, 1990. — 687 с.
5. Ковалева, А. В. Композиционные материалы в технике и исследование возможностей получения изделий из разнородных материалов в литейном производстве [Текст]: учебное пособие / А. В. Ковалева, А. А. Черный. — Пенза: Пензенский государственный университет, 2008. — 161 с.
6. Андреева, А. В. Основы физикохимии и технологии композиций [Текст] / А. В. Андреева. — М.: Радиотехника, 2001. — 191 с.
7. Balog, M. Forged HITEMAL: Al-based MMCs strengthened with nanometric thick Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> skeleton [Text] / M. Balog, P. Krizik, M. Nosko, Z. Hajovska, M. Victoria Castro Riglos, W. Rajner, D.-S. Liu et al. // Materials Science and Engineering: A. — 2014. — Vol. 613. — P. 82–90. doi:10.1016/j.msea.2014.06.070
8. Habibnejad-Korayem, M. Work hardening behavior of Mg-based nano-composites strengthened by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-particles [Text] / M. Habibnejad-Korayem, R. Mahmudi, W. J. Poole // Materials Science and Engineering: A. — 2013. — Vol. 567. — P. 89–94. doi:10.1016/j.msea.2012.12.083
9. Ustinov, A. Diffusion welding of aluminium alloy strengthened by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles through an Al/Cu multilayer foil [Text] / A. Ustinov, Y. Falchenko, T. Melnichenko, A. Shishkin, G. Kharchenko, L. Petrushinets // Journal of Materials Processing Technology. — 2013. — Vol. 213, № 4. — P. 543–552. doi:10.1016/j.jmatprotec.2012.11.012
10. Sun, W. Preparation of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dispersion strengthened coating via coating-substrate co-sintering and underwater shock wave compaction [Text] / W. Sun, X. Li, K. Hokamoto // Ceramics International. — 2013. — Vol. 39, № 4. — P. 3939–3945. doi:10.1016/j.ceramint.2012.10.241
11. Дёмин, Д. А. Оптимизация технологического процесса в цехе предприятия [Текст] / Д. А. Дёмин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2005. — № 6/1. — С. 48–59.
12. Коваленко, Б. П. Оптимизация состава холоднотвердеющих смесей (ХТС) с пропиленкарбонатом [Текст] / Б. П. Коваленко, Д. А. Дёмин, А. Б. Божко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2006. — № 6. — С. 59–61.

#### УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ КОМПОЗИЦІЙНОГО СПЛАВУ ТИПУ СПЕЧЕНИЙ АЛЮМІНІЄВИЙ ПОРОШОК (САП)

У статті представлений аналіз складу і властивостей різних дисперсно-зміцнених композиційних матеріалів на основі алюмінію, що застосовуються при виробництві аерокосмічної техніки. Проведено аналіз властивостей даних матеріалів для забезпечення управління їхньою якістю. Побудовано математичні моделі залежності параметрів САП від вмісту оксиду алюмінію і температури.

**Ключові слова:** композиційний матеріал, дисперсно-зміцнений, алюміній, міцність, математична модель, границя плинності, границя міцності.

*Макаренко Дмитрій Николаевич, асистент, кафедра автомобілей та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна, e-mail: makaronesi@ukr.net.*

*Макаренко Дмитро Миколайович, асистент, кафедра автомобілів та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет ім. М. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна.*

*Makarenko Dmytro, Zhukovsky National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Ukraine, e-mail: makaronesi@ukr.net*

УДК 681.3

DOI: 10.15587/2312-8372.2014.34756

Федотов В. В.

## СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ОПТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

*Досліджено та проаналізовано оптичні властивості напівпровідникових матеріалів. В результаті теоретичного аналізу було виявлено основні залежності показників заломлення, поглинання та відбиття від довжини хвилі випромінювання. Встановлено залежність між інтенсивністю падаючого пучка та інтенсивністю вихідного (відбитого або такого, що пройшов через напівпровідник) пучка з урахуванням коефіцієнту поглинання (відбиття) матеріалу.*

**Ключові слова:** напівпровідник, оптична властивість, фотон, оптична ширина забороненої зони, показник заломлення.

### 1. Вступ

В останній час відбувається постійне зростання обсягів інформації, що передається в обчислювальних системах, що обумовлює для них актуальність проблем паралельного введення великої кількості інформації. Вже досить довгий час існують електрично керовані напівпровідникові транспаранти, які мають оптичні виходи. Однак, такі пристрої мають багато проблем. Вони, зазвичай, споживають багато енергії, тому і не використовуються масово у пристроях, що працюють в реальних цифрових системах [1].

Дослідження нелінійно-оптичних явищ у напівпровідниках викликає підвищений інтерес, як з погляду фундаментальної науки, так і з погляду величезних перспектив практичного використання результатів досліджень при створенні нових приладів квантової електроніки. Розвиток лазерної техніки й можливість генерації коротких і ультракоротких імпульсів дозволили виявити й досліджувати нові явища, у тому числі й вищеописаний ефект самовідбиття.

Найбільш характерною оптичною властивістю напівпровідника є існування краю поглинання  $E_0$ . Для