

03, март 2016

УДК 620.17:621.646.94

О расчете амортизирующих характеристик по диаграммам деформирования блоков внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов

***Попов Ю.В.**, студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Высокоточные летательные аппараты»*

*Научный руководитель: Пусев В.И., к.т.н., доцент
кафедры «Высокоточные летательные аппараты»,
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

kafsm4@sm.bmstu.ru

В известных методах механических испытаний блоков внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов (далее – блоки) при статических и динамических нагрузках не предусмотрено доведение конструкции блоков до пластических деформаций и уплотнения. Это связано с тем, что основной целью этих испытаний является проверка функционирования аппаратуры при неразрушающих эксплуатационных нагрузках [1-3]. В результате испытаний блоков внутреннего оборудования на сжатие при упругопластических деформациях и уплотнении получены диаграммы деформирования, которые позволяют оценить не только механические свойства, но и амортизирующие характеристики блоков.

Испытания блоков (рис. 1) проводились в статических условиях на прессе силой 0,5 МН. В процессе деформирования и уплотнения проводилась непрерывная запись диаграмм деформирования в координатах сила-перемещение (F - x). Пересчет машинных диаграмм в координаты напряжение-деформация (σ - ϵ) проводился при условии постоянной площади поперечного сечения блоков, равной начальной, так как при деформировании и уплотнении площадь поперечного сечения увеличилась незначительно (не более 5...10 %) [4].

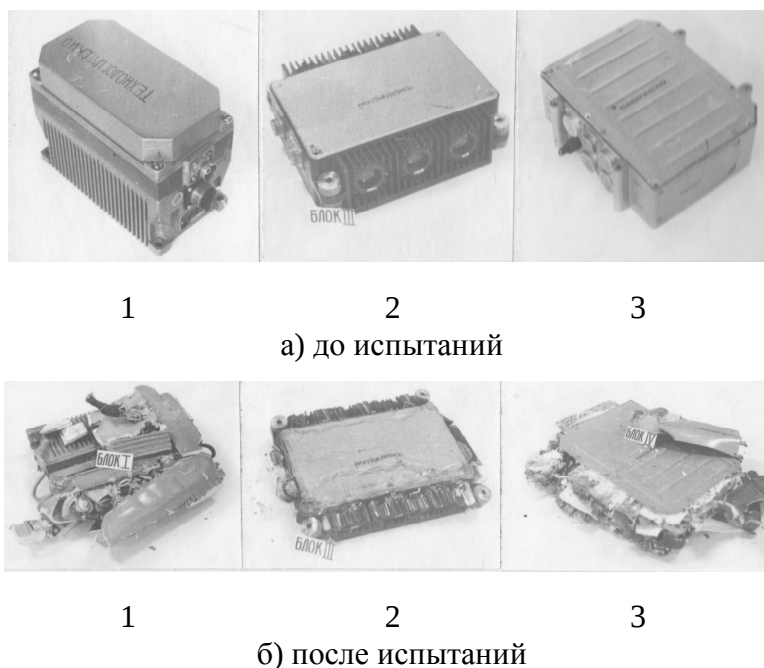


Рис. 1. Блоки внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов

Диаграммы деформирования приведены на рисунке 2. Причем сплошными линиями обозначены диаграммы деформирования блоков, а штриховыми линиями – аппроксимация с помощью логарифмической зависимости (1) напряжения σ от деформации ε , примененной в [5] для пористых металлов в следующем виде:

$$\sigma = A \ln \left(\frac{\alpha}{\alpha - 1} \right) + B, \quad (1)$$

где A , B – эмпирические константы; α – пористость, определяемая как частное от деления плотности материала матрицы (сплошного, кристаллического материала) к средней плотности пористой среды.

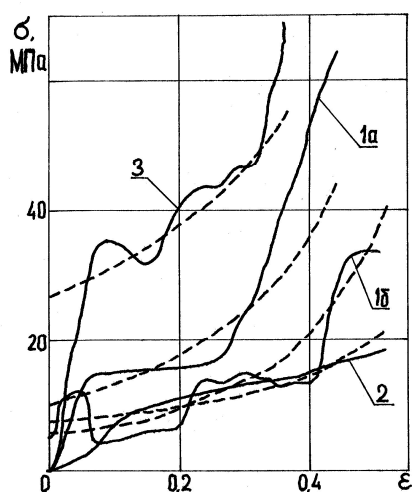


Рис. 2. Диаграммы деформирования блоков при пластических деформациях и уплотнении

С учетом незначительного изменения площади поперечного сечения блоков внутреннего оборудования при деформировании и уплотнении из уравнения (1) может быть получена формула для аппроксимации диаграмм деформирования блоков внутреннего оборудования [4]:

$$\sigma = A \ln \left(\frac{\alpha_0 (1 - \varepsilon)}{\alpha_0 (1 - \varepsilon) - 1} \right) + B,$$

где α_0 – начальная пористость, ε – осевая деформация.

Коэффициенты A и B для аппроксимации диаграмм деформирования и уплотнения, а также начальная пористость (α_0) различных блоков внутреннего оборудования приведены в таблице 1 [4,6].

Таблица 1

Коэффициенты и начальная пористость для блоков при аппроксимации диаграмм деформирования блоков

N п/п	A, МПа	B, МПа	α_0
1а	40	-12	2,38
1б	25	-8,6	2,38
2	15	0,8	2,77
3	75	-6	2,83

Одной из амортизирующих характеристик является удельная энергия поглощения удара, которая определяется площадью под диаграммой деформирования [4]:

$$A = \int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma d\varepsilon. \quad (2)$$

Эффективная энергия поглощения удара определяется как отношение удельной энергии поглощения удара реального амортизатора к удельной энергии поглощения удара идеального амортизатора и всегда меньше единицы [4]:

$$E = \frac{A}{\sigma_{\max} \cdot \varepsilon_{\max}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\max}$ – максимальное напряжение, возникающее на отрезке $[0, \varepsilon_{\max}]$; $\varepsilon_{\max}$ – максимальная деформация. Эффективная энергия поглощения удара применяется для сравнительной оценки амортизирующих свойств материалов и конструкций.

Для определения рассмотренных амортизирующих характеристик необходимо вычислить интеграл от функции $\sigma(\varepsilon)$. Данная функция задана таблично на отрезке $[0, \varepsilon_{\max}]$, что не позволяет получить решение в аналитическом виде. Но задачу можно решить путем численного интегрирования и получить приближенное значение интеграла.

Введем на отрезке $[0, \varepsilon_{\max}]$ сетку с переменным шагом h_i , которая соответствует множеству точек:

$$w_h = \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_i = \sum_{k=1}^i h_k, i = \overline{0, N} \\ \sum_{i=1}^N h_i = \varepsilon_{\max} \end{array} \right\}.$$

Представим интеграл в виде суммы интегралов по частичным отрезкам

$$\int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon = \sum_{i=1}^N \left(\int_{\varepsilon_{i-1}}^{\varepsilon_i} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \right). \quad (4)$$

Таким образом, для построения формулы численного интегрирования на всем отрезке достаточно построить квадратурную формулу для интеграла

$$\int_{\varepsilon_{i-1}}^{\varepsilon_i} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$$

на частичном отрезке $[0, \varepsilon_{\max}]$ и воспользоваться уравнением (4).

Для вычисления интеграла на частичном отрезке воспользуемся формулой трапеций [7]:

$$\int_{\varepsilon_{i-1}}^{\varepsilon_i} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \cong \frac{\sigma(\varepsilon_{i-1}) + \sigma(\varepsilon_i)}{2} h_i,$$

которая получается путем замены подынтегральной функции $\sigma(\varepsilon)$ интерполяционным многочленом первой степени, построенным по узлам $\varepsilon_{i-1}, \varepsilon_i$.

При вычислении удельной энергии поглощения удара и эффективной энергии поглощения удара использовался пакет прикладных программ MatLab. Удельная энергия поглощения удара вычислялась с помощью функции `trapz(x,y)`, реализующей метод трапеций. Входными аргументами данной функции являются x, y – вектор значений деформации ε и вектор значений напряжений $\sigma(\varepsilon)$ соответственно. Сформировав векторы-столбцы значений деформации и напряжений, реализуем следующий алгоритм и получим вектор-столбец значений удельной энергии поглощения удара.

```
N=length(x);
A(1)=0;
for i=2:N
    A(i)=trapz(x(1:i),y(1:i));
end
A=A';
```

В результате получен вектор, содержащий значения удельной энергии поглощения удара, которые поставлены в соответствие значениям деформации. Это позволяет построить график зависимости $A(\varepsilon)$.

Для практического использования полученных данных определим погрешность найденного значения удельной энергии поглощения удара. Для этого проведем апостериорную оценку погрешности по правилу Рунге [7,8].

Рассмотрим квадратурную формулу, имеющую на частичном отрезке порядок точности m . В этом случае справедливо выражение

$$I_i - I_{h,i} \cong c_i h_i^m, \quad (5)$$

где I_i – точное значение интеграла на частичном отрезке, $I_{h,i}$ – квадратурная сумма на частичном отрезке. Тогда на основании (5) можем записать, что

$$I_i - I_{h/2,i} \cong c_i \left(\frac{h_i}{2} \right)^m. \quad (6)$$

Подставив (5) в (6) и выполнив преобразования, получим

$$I_i - I_{h,i} \cong 2^m (I_i - I_{h/2,i}),$$

$$I_i - I_{h/2,i} \cong \frac{I_{h/2,i} - I_{h,i}}{2^m - 1}.$$

Проведем на каждом частичном отрезке $[\varepsilon_{i-1}, \varepsilon_i]$ все вычисления дважды, один раз – с шагом h_i и второй раз – с шагом $h_i/2$ и оценим погрешность по правилу Рунге:

$$R_0 = |I - I_{h/2}| = \sum_{i=0}^N |I_i - I_{h/2,i}| \cong \frac{|I_{h/2} - I_h|}{2^m - 1}. \quad (7)$$

Отметим, что для метода трапеций $m=2$, тогда выражение (7) примет вид:

$$R_0 \cong \frac{|I_{h/2} - I_h|}{3}. \quad (8)$$

Относительная погрешность Δ полученного значения удельной энергии поглощения удара для блока 2 не превосходит 0,2 % (табл. 2).

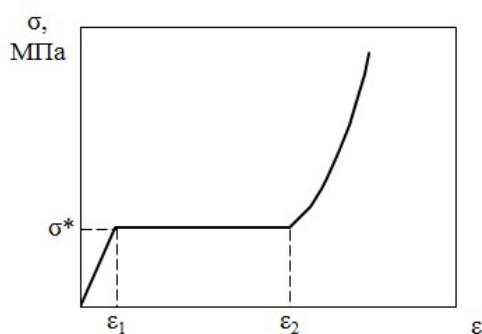
Таблица 2

Удельная энергия поглощения удара для блока 2 при различных значениях деформации

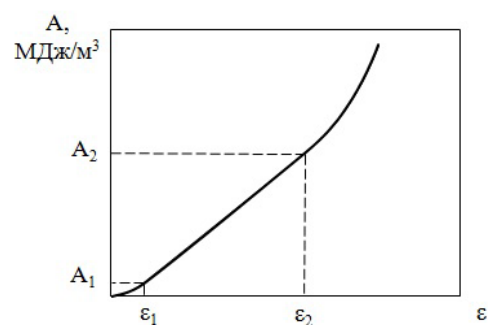
ε	A , кДж/м ³	R_0 , кДж/м ³	Δ , %
0,047	34	0,1	0,19
0,1	235	0,2	0,09
0,149	652	0,3	0,05
0,194	1131	0,3	0,03
0,297	2412	0,5	0,02
0,403	3962	0,2	0,005
0,508	5729	0,4	0,01

Проведя расчет по формуле (3), получим вектор, содержащий значения эффективной энергии поглощения удара, которые поставлены в соответствие значениям деформации. Это позволяет построить график зависимости $E(\varepsilon)$.

Рассмотрим идеализированную диаграмму деформирования (рис. 3а).



а



б

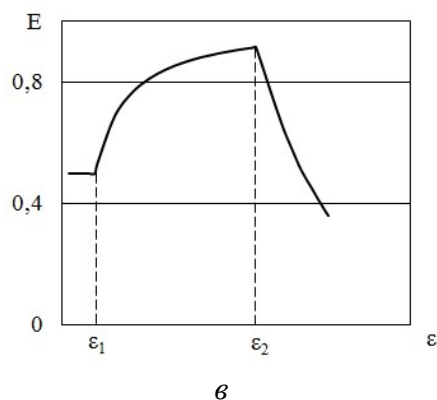
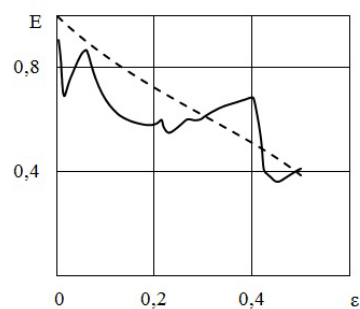
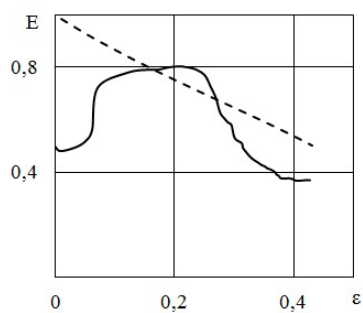
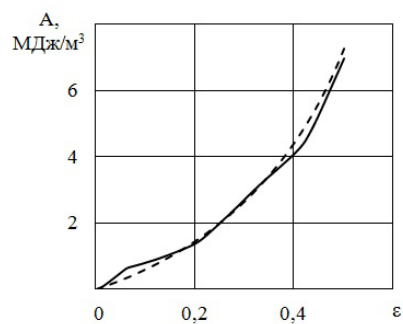
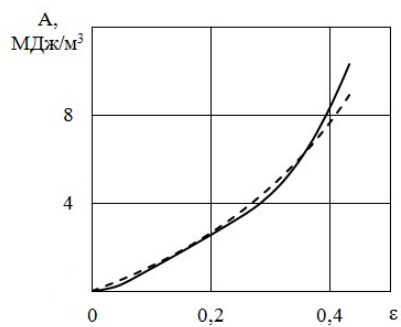
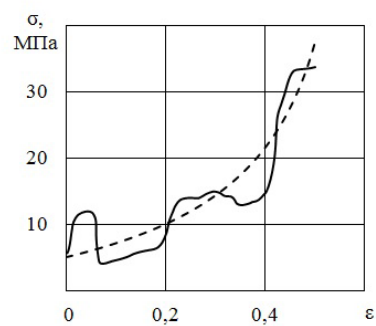
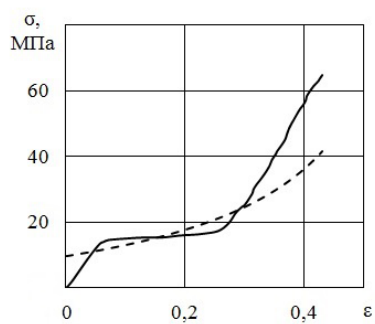


Рис. 3. Типичная идеализированная диаграмма деформирования (*a*), удельная энергия поглощения удара (*б*) и эффективная энергия поглощения удара (*в*) для высокопористых упругопластичных сред

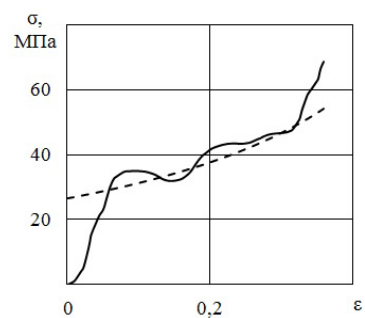
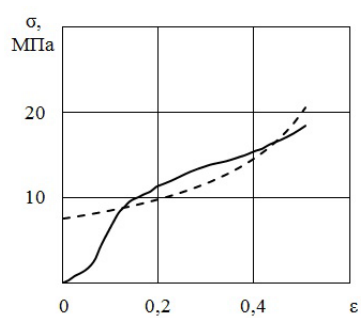
Идеализированная диаграмма имеет характерные стадии: линейная упругая стадия от 0 до ε_1 , обусловленная упругими деформациями, уплотнительно-пластическая стадия от ε_1 до ε_2 соответствует линейной зависимости удельной энергии поглощения удара (рис. 3б) и пластическая стадия от ε_2 . Участок графика эффективной энергии поглощения удара (рис. 3в), соответствующий уплотнительно-пластической стадии, имеет вид гиперболы, асимптотически стремящейся к единице, то есть к идеальному амортизатору. Таким образом, материал, имеющий более выраженную и протяженную уплотнительно-пластическую стадию, в большей мере соответствует идеальному амортизатору. Некоторые высокопористые алюминиевые сплавы имеют диаграммы деформирования, которые близки к идеализированной в диапазоне начальной пористости α_0 от 2,31 до 3,06 [9,10]. Однако, большинство исследованных высокопористых алюминиевых сплавов имеют диаграмму деформирования с упрочнением [11-15], что ухудшает их амортизирующие характеристики. Вид диаграммы деформирования зависит не только от начальной пористости, но и от материала матрицы, структуры и формы пор.

В результате расчета получены графики (рис. 4) удельной энергии поглощения удара и эффективной энергии поглощения удара блоков. Причем сплошными линиями обозначены результаты, полученные для диаграмм деформирования блоков, а штриховыми линиями – для аппроксимации с помощью логарифмической зависимости (1).



a

б



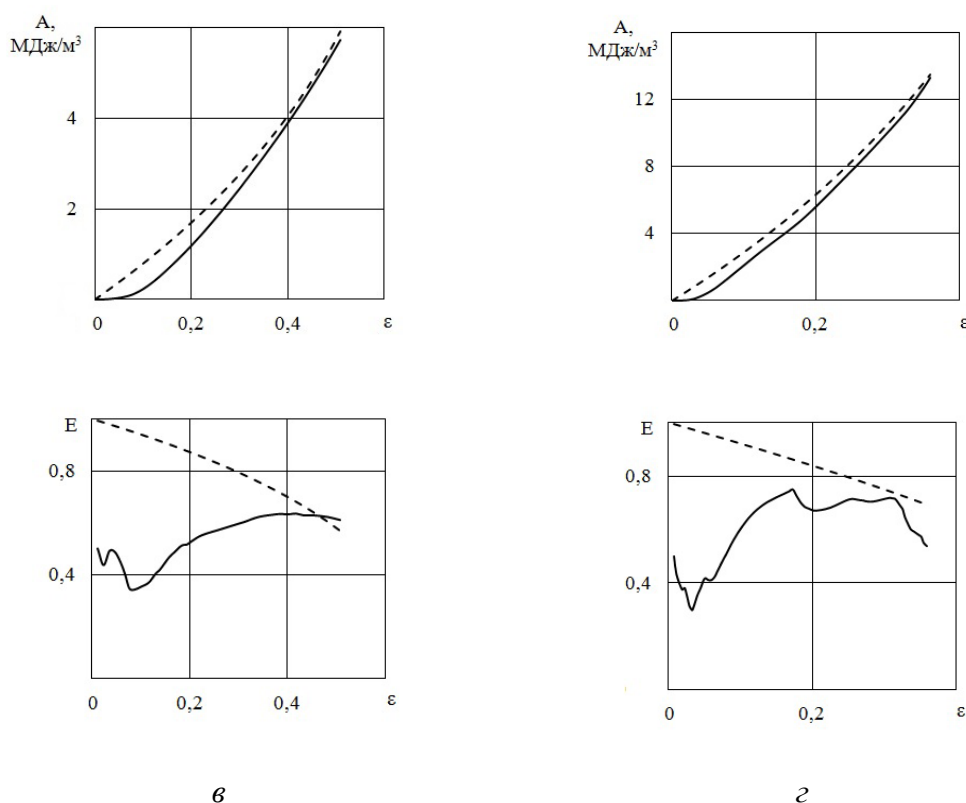


Рис. 4. Диаграммы деформирования, удельные энергии поглощения удара и эффективные энергии поглощения удара испытанных образцов блоков при пластических деформациях и уплотнении (а – блок 1а, б – блок 1б, в – блок 2, г – блок 3)

Отметим, что напряжения, полученные в ходе эксперимента, близки к напряжениям для пеноалюминия различных марок [12,14,16].

Рассмотрим относительное отклонение δ значения удельной энергии поглощения удара, вычисленного для аппроксимации с помощью логарифмической зависимости (1) от значения, полученного в соответствии с (2) по диаграммам деформирования. В результате анализа полученных данных для различных блоков внутреннего оборудования можно выделить область ($\epsilon > \epsilon_0$) в которой рассмотренное отклонение не превышает 10-13 % (табл. 3).

Таблица 3

Область ($\epsilon > \epsilon_0$)

N п/п	ϵ_0	δ , %
1а	0,1	<13
1б	0,15	<10
2	0,3	<13
3	0,2	<13

Также показано, что относительное отклонение значения эффективной энергии поглощения удара, рассчитанного с помощью аппроксимации диаграммы деформирования по формуле (1) от значения, полученного по диаграмме деформирования с использованием (3), составляет величину порядка 50...200 %.

Представленные результаты расчета амортизирующих характеристик позволяют сделать вывод о том, что по эффективной энергии поглощения удара испытанные конструкции блоков могут на 60...80 % соответствовать идеальному амортизатору. Таким образом, исследованные блоки обладают удовлетворительными амортизирующими свойствами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-08-007869-а).

Список литературы

- [1]. Ленк А., Ренитц Ю., Механические испытания приборов и аппаратов. М.: Мир, 1976. 270 с.
- [2]. Батуев Г.С., Голубков Ю.В., Ефремов А.К., Федосов А.А. Инженерные методы исследования ударных процессов. М.: Машиностроение, 1977. 240 с.
- [3]. Кузьмин Э.Н. Обеспечение виброударостойкости оборудования и аппаратуры: монография. 2-е изд., испр. и доп. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2006. 320 с.
- [4]. Белов Г.В., Гусаров А.П., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Попов Ю.В., Пусев В.И., Селиванов В.В. Деформирование блоков внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов при больших упругопластических деформациях и уплотнении // XXI Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (Вятчи, 16-20 февраля 2015 г.): материалы симпозиума. Т. 2. М.: ООО «ТРП», 2015. С. 95-101.
- [5]. Heckel R.W. An analysis of powder compaction phenomena // Trans. Met. Soc. AIME. 1961. V.221. N 6. P. 173-183.
- [6]. Белов Г.В., Гусаров А.П., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Селиванов В.В. Об особенностях конструкции блоков внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов // XXI Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (Вятчи, 16-20 февраля 2015г.): материалы симпозиума. Т. 2. М.: ООО «ТРП», 2015. С. 87-95.
- [7]. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. Вычислительные методы для инженеров: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1994. 544 с.

- [8]. Блюмин А.Г., Федотов А.А., Храпов П.В. Численные методы вычисления интегралов и решения задач для обыкновенных дифференциальных уравнений: Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Численные методы». М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2008. 74 с. Режим доступа: http://hoster.bmstu.ru/~fn1/wp-content/uploads/2011/08/uchebno-metod/Blumin_Fed_Hrap_chisl_met.pdf (дата обращения 03.07.2015).
- [9]. Гусаров А.П., Жариков А.В., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Селиванов В.В., Сообщиков А.Н. Механические и амортизирующие свойства высокопористого ячеистого алюминия // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2009. №1 (74). С. 58-66.
- [10]. Гусаров А.П., Жариков А.В., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Селиванов В.В., Сообщиков А.Н. О механических и амортизирующих свойствах ячеистого алюминия при сжатии и вторичном нагружении // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред (Ярополец, 16-20 февраля 2009 г.): материалы XV Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова Т. 2. М.: Изд. «Типография «ПАРАДИЗ», 2009. С. 84-93.
- [11]. Гусаров А.П., Жариков А.В., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Селиванов В.В., Сообщиков А.Н. Экспериментальная оценка определяющих уравнений высокопористых металлов // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред (Ярополец, 18-22 февраля 2008 г.): Материалы XIV Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова Т. 2. М.: Изд. МАИ, 2008. С. 72-83.
- [12]. Сионоя С. Пористый алюминий и его применение. Перевод 74/11416-В. М.: ГПНТБ, 1973. 12 с.
- [13]. Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Гусаров А.П. Механические свойства пористых объемно-перфорированных алюминиевых сплавов // Научно-техническая конференция к 170-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана. Тезисы докладов в 2-х ч. (Москва, 21-23 ноября 2000 г.). Ч. 1. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. С. 157.
- [14]. Thornton P.H., Magee C.L. The deformation of aluminium foams // Met. Trans. A. 1975. V.16A. N 6. P. 1253-1263.
- [15]. Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Гусаров А.П. Поведение пористых металлов при уплотнении // Механика импульсных процессов. Труды МВТУ N 399 . М.:МВТУ им. Н.Э. Баумана,1983. С. 29-35.

- [16]. Альтман М.Б., Борок Б.А., Меркулов В.В., Малин А.П., Спектор Ю.В. и др. Литые заготовки из пенистого алюминия / В кн. Алюминиевые сплавы под ред. И.Н. Фридляндера. Вып. 1. М.: Оборонгиз, 1963. С. 41-49.