

А. П. Гусаров, А. В. Жариков,
В. А. Марков, А. Ф. Овчинников,
В. И. Пусев, В. В. Селиванов,
А. Н. Сообщиков

МЕХАНИЧЕСКИЕ И АМОРТИЗИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПОРИСТОГО ЯЧЕЙСТОГО АЛЮМИНИЯ

Рассмотрены механические свойства высокопористого ячейстого алюминия на основе литейного алюминиевого сплава АК7 с порами сферической формы. Проведено сравнение свойств ячейстого алюминия, пеноалюминия и объемно-перфорированного алюминиевого сплава на основе Д16Т. Полученные диаграммы уплотнения ячейстого алюминия позволили оценить его амортизирующие свойства.

Пористые металлы применялись в научно-исследовательских целях в 1950-х гг. для изучения свойств металлов при высоких ударно-волновых давлениях (до 2 ТПа) [1]. На важность этих исследований впервые обратил внимание академик Я.Б. Зельдович в 1957 г. [1, 2]. Практически в это же время были предприняты попытки производства и применения пористого алюминия, получаемого на основе вспенивания алюминия и его сплавов (пеноалюминий) в авиаракетной и космической технике [3, 4]. Однако технологии вспенивания в то время не позволяли обеспечить стабильную структуру и, соответственно, механические свойства пеноалюминия, что привело к широкому применению в авиаракетной и космической технике сотовых конструкций.

Дальнейшие эпизодические исследования пеноалюминия были связаны с его возможным применением в качестве конструкционного, звукоизолирующего и амортизирующего материала в строительстве, на железнодорожном [5, 6] и автомобильном транспорте [5, 7]. В последние годы интерес к пористым металлам существенно повысился, о чем может свидетельствовать проведение со второй половины 1990-х гг. регулярных европейских конференций, а с 1999 г. — регулярных (каждые 2 года) международных конференций по проблемам производства, машиностроительным технологиям и фундаментальным соотношениям между структурой и свойствами ячейстых металлов и пенометаллов [8] (сокращенно MetFoam).

В работе [8] повышенный интерес к пористым металлам объясняется не только совершенствованием технологий их получения, улучшением качества и снижением стоимости, но и высокими требованиями к современным машинам в различных областях (например, к автомобилям и другим транспортным средствам в связи с возрастанием требований к безопасности пассажиров и т.д.). Кроме того, в

работе [8] отмечено, что наибольшее число работ связано с ячеистыми металлами и пенометаллами, полученными на основе алюминия и алюминиевых сплавов. В настоящей статье рассматриваются механические и амортизирующие свойства высокопористого ячеистого алюминия, полученного на основе литейного алюминиевого сплава АК7 (далее — сплав АК7).

В соответствии с данными работы [9] высокопористым ячеистым алюминием считается ячеистый алюминий с начальной пористостью α_0 в диапазоне от 1,2 до 8, а начальная пористость α_0 определяется отношением плотности ρ материала матрицы к начальной средней плотности ρ_0 образца. Следует отметить, что ячеистые металлы в отличие от пенометаллов, могут иметь регулярную структуру, что предопределяет более стабильные механические свойства. Образцы высокопористого ячеистого алюминия с порами сферической формы заданного размера (рис. 1) изготавливаются литьем по выплавляемым моделям, а их максимальная пористость ограничивается жидкотекучестью сплава АК7.

Для статических испытаний на сжатие в условиях одноосного напряженного состояния использовали образцы ячеистого алюминия цилиндрической формы с диаметром пор 4 и 6 мм (таблица) и длиной, которая отличалась от длины образцов в состоянии поставки (см. рис. 1). Относительную длину образцов выбирали с учетом рекомендаций работ [10, 11], а также из условия исключения потери устойчивости образцов при больших деформациях: $H_0/D_0 < 0,5$ (см. таблицу). При испытаниях регистрировали $F-x$ диаграмму (сила–перемещение), используя комплекс INSTRON 6027 с максимальной силой 400 кН. Полученные $F-x$ диаграммы (в графическом и цифровом вариантах), перестроенные в диаграммы $\sigma-\varepsilon$ (напряжение–деформация), позволяют судить об основных закономерностях процесса уплотнения (рис. 2). Из анализа диаграмм уплотнения (рис. 2, а–в) следует, что процесс деформирования можно условно разделить на три этапа.

Первый этап сопровождается деформированием перемычек между порами, находящимися в плоскости приложения нагрузки, и характеризуется линейной или близкой к линейной зависимостью напряжений

Основные характеристики образцов высокопористого ячеистого алюминия

Тип образца	Диаметр пор d_0 , мм	Диаметр образца D_0 , мм	Относительная высота образца H_0/D_0	Начальная средняя плотность ρ_0 , г/см ³	Начальная пористость α_0
I	4	23,4–24,0	0,41–0,44	0,916–1,17	2,31–2,95
II	6	23,2–24,1	0,42–0,43	0,883–1,06	2,55–3,06

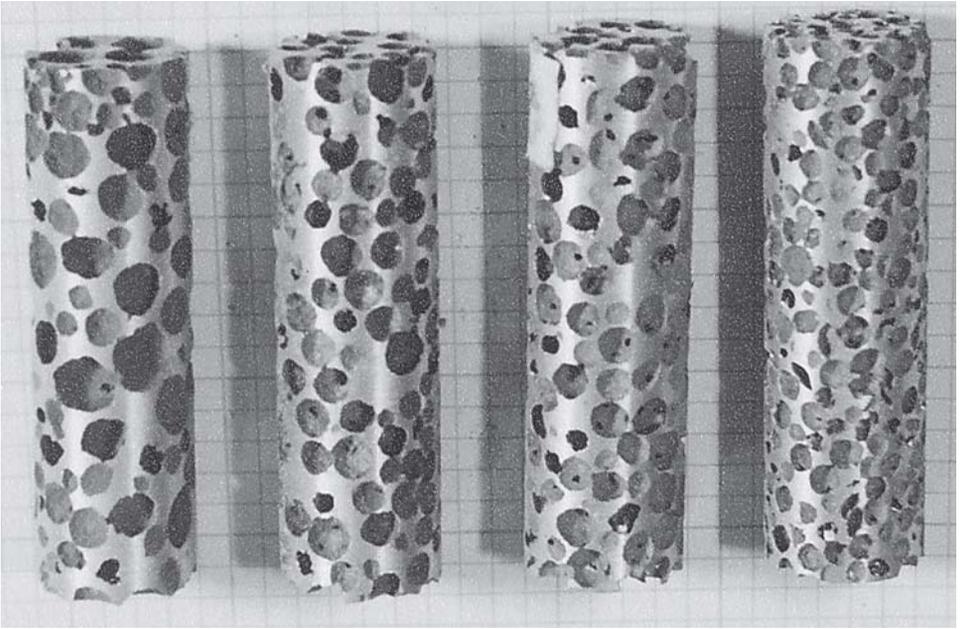


Рис. 1. Образцы ячеистого алюминия на основе сплава АК7 в состоянии поставки

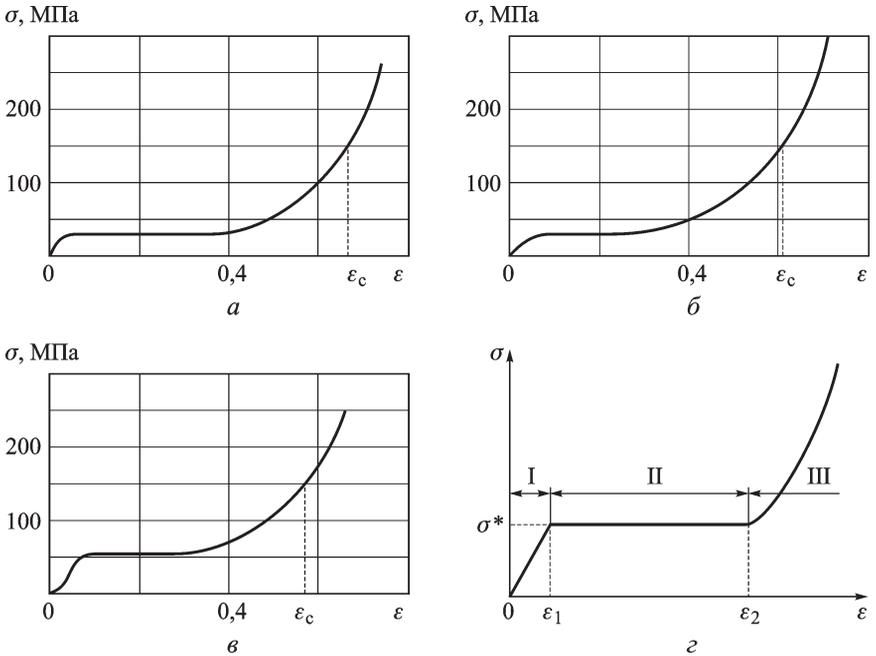


Рис. 2. Диаграммы уплотнения образцов ячеистого алюминия (а, б, в) и идеализированная диаграмма уплотнения (з): со сферическими порами диаметром 6 мм (а – $\alpha_0 = 3,06$; б – $\alpha_0 = 2,57$) и 4 мм (в – $\alpha_0 = 2,3$)

от деформаций. Завершается данный этап деформирования достижением напряжений σ^* , которые будем называть эффективным пределом текучести. Тогда деформацию ε_1 , соответствующую завершению первого этапа (рис. 2, ε), можно определить по выражению $\varepsilon_1 = \sigma^*/E^*$, где E^* — эффективный модуль упругости.

Второй этап деформирования связан с пластическим уплотнением образцов и характеризуется для ячеистого алюминия практически постоянным эффективным напряжением. Заканчивается этап при достижении деформации ε_2 (см. рис. 2, ε). Пластическое уплотнение сопровождается заполнением пор в образцах ячеистого алюминия.

Третий этап характеризуется резким возрастанием эффективных напряжений при относительно малых деформациях (см. рис. 2, ε). На этом этапе происходит дальнейшее заполнение пустот в образцах.

Полученные диаграммы уплотнения ячеистого алюминия (см. рис. 2, a – b) независимо от его начальной пористости и размера пор, в отличие от диаграмм уплотнения пеноалюминия марки Альмаг-35 [5] на основе алюминия 7075 и алюминиево-магниевого сплава (7% Mg) [7] и высокопористых объемно-перфорированных образцов на основе алюминиевого сплава Д16Т [9] с упрочнением в уплотнительно-пластической области, практически соответствуют идеализированной диаграмме уплотнения (см. рис. 2, ε). Следует отметить, что полученные значения эффективного предела текучести ячеистого алюминия близки к данным из работы [3], где отмечено, что для пеноалюминия на основе алюминиевых сплавов АЛ2 и АЛ22 при $\rho_0 = 0,8 \text{ г/см}^3$ ($\alpha_0 = 3,37$) эффективный предел текучести не превышает 39,2 МПа. Протяженность уплотнительно-пластической стадии на диаграммах уплотнения, определяемая значением деформации ε_2 (см. рис. 2, ε), существенно зависит от начальной пористости α_0 и на приведенных диаграммах уменьшается по мере снижения начальной пористости от $\varepsilon_2 = 0,368$ ($\alpha_0 = 3,06$; см. рис. 2, a) до $\varepsilon_2 = 0,293$ ($\alpha_0 = 2,3$; см. рис. 2, b).

Если пренебречь радиальными деформациями испытанных образцов, не превышающими 15%, можно получить выражение, связывающее текущую пористость с осевой деформацией: $\alpha = \alpha_0/(1 - \varepsilon)$, а также выражение для определения деформации полного уплотнения образца:

$$\varepsilon_c = \alpha_0/(\alpha_0 - 1). \quad (1)$$

При расчетной оценке эффективного предела текучести образцов ячеистого алюминия на основе модели полых сфер Кэрролла–Холта [12] получены значительные расхождения с экспериментальными данными, которые отмечены в работе [9].

Диаграммы σ – ε образцов ячеистого алюминия могут служить основой для расчета их амортизирующих свойств, которые определяют способность ячеистого алюминия к ослаблению (изоляция)

ударных воздействий. Следует отметить широкое применение наряду с термином “амортизирующие свойства” (характеристики) термина “демпфирующие свойства” (характеристики), например в работах [13–16], поэтому целесообразно остановиться не только на их смысловом значении, но и на их физической сущности.

В соответствии с работой [17] демпфер (от немецкого *dampfer* — глушитель) — это устройство, служащее для уменьшения (демпфирования) или предотвращения вредных механических колебаний звеньев машин и механизмов и поглощающее энергию механических колебаний; а амортизатор (от французского *amortir* — ослаблять, смягчать) — устройство для смягчения ударов в конструкциях машин и сооружений в целях их защиты от сотрясений и больших нагрузок.

Указанные термины имеют не только формально-лингвистические отличия, но и различную физическую основу. Демпфирующие свойства конструкционных металлов определяются упругими постоянными и модулем упругости, а проявляются при весьма низких напряжениях, которые намного меньше предела текучести металла [18]. В отличие от демпфирующих свойств, амортизирующие свойства пористых металлов проявляются при больших пластических деформациях, возникающих при пластическом уплотнении [5, 7–9]. Поэтому в настоящей работе применяется термин “амортизирующие свойства”, а для анализа каждого этапа деформирования высокопористого ячеистого алюминия можно определить амортизатор-аналог.

Очевидно, что упругая стадия деформирования I идеализированной диаграммы уплотнения ячеистого алюминия (см. рис. 2, з) соответствует амортизатору-аналогу с постоянной жесткостью без начальной затяжки (рис. 3, а), уплотнительно-пластическая стадия II — идеальному амортизатору (рис. 3, б), а пластическая стадия III — амортизатору-аналогу с жесткой нелинейной характеристикой (рис. 3, в) [19]. Среди амортизаторов наилучшим считается тот, который способен воспринимать возможно большую энергию удара при минимальном значении силы. В этом случае оптимальной характеристикой считается такая, при которой для любого удара (при различных скоростях

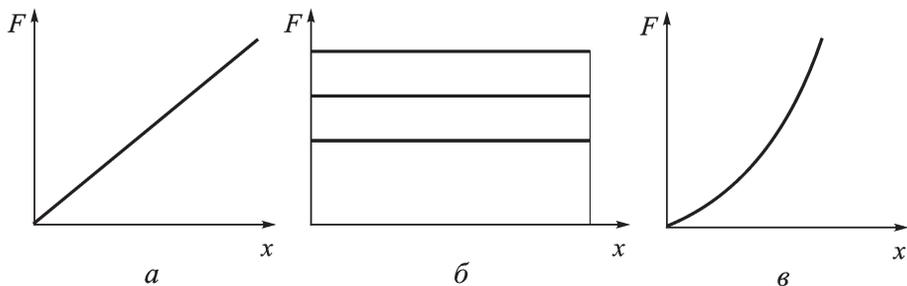


Рис. 3. Типичные силовые характеристики амортизатора удара [19]:

а — амортизатор с постоянной жесткостью без начальной затяжки; *б* — идеальный амортизатор; *в* — амортизатор с жесткой нелинейной характеристикой

удара) сжатие амортизатора равно его полному ходу, а сила сжатия $F = \text{const}$. Такой амортизатор как бы приспособляется к условиям удара, и максимальная сила меньше, чем при любой другой силовой характеристике (см. рис. 3). Поэтому такую характеристику называют идеальной [19]. Таким образом, высокопористый ячеистый алюминий на основе сплава АК7 независимо от диаметра сферических пор и начальной пористости имеет уплотнительно-пластическую стадию II (см. рис. 2, *з*), соответствующую идеальному амортизатору-аналогу (см. рис. 3, *б*). Именно это свойство позволило в работе [13] и в других аналогичных работах применить пористые материалы для формирования импульса нагрузки практически прямоугольной формы, который в работе [13] использовали при калибровке пьезоакселерометров. Проведенный анализ амортизирующих свойств высокопористого ячеистого алюминия носит качественный характер, а для их количественной оценки можно использовать известные подходы [5, 7, 19].

При расчете амортизаторов удара фактическая силовая характеристика амортизатора сопоставляется с идеальной с помощью коэффициента полноты поглощения удара E'_Π [19]:

$$E'_\Pi = \int_0^{x_{\max}} F dx / (F_{\max} x_{\max}).$$

Коэффициент E'_Π представляет собой отношение фактической энергии удара, воспринятой амортизатором, к энергии, воспринятой идеальным амортизатором при максимальной силе F_{\max} и максимальном перемещении x_{\max} , и позволяет в определенной степени судить о его преимуществах [19]. Аналогично в работе [7] определена эффективная энергия поглощения удара E''_Π для пеноалюминия на основе диаграммы $\sigma - \varepsilon$:

$$E''_\Pi = \int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma d\varepsilon / (\sigma_{\max} \varepsilon_{\max}).$$

Эффективная энергия поглощения удара E''_Π является наиболее удобной для количественной оценки амортизирующих свойств пористых металлов. Можно показать, что для линейного участка диаграммы $\sigma - \varepsilon$ при угле наклона 45° $E''_\Pi = 0,5$, а для участка с постоянным напряжением $E''_\Pi = 1$. Идеальные амортизирующие свойства соответствуют значению $E''_\Pi = 1$.

Количественная оценка амортизирующих свойств ячеистого алюминия на основе эффективной энергии поглощения удара (рис. 4) подтверждает приведенную ранее качественную оценку по отношению к высокопористым объемным образцам из сплава Д16Т, так как максимальное значение E''_Π для ячеистого алюминия на 5,9% больше,

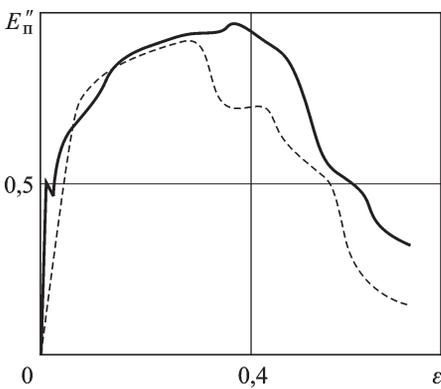


Рис. 4. Эффективная энергия поглощения удара высокопористыми алюминиевыми сплавами с регулярной структурой:

сплошная кривая — ячеистый алюминий на основе сплава АК7 ($\alpha_0 = 3,06$; см. рис. 2, а); штриховая кривая — ортогонально-перфорированный образец на основе сплава Д16Т ($\alpha_0 = 4,3$ [9])

что в качестве амортизаторов в автомобильной промышленности применяются материалы с $\Pi < 0,7$. Если следовать этому ограничению, то ячеистый алюминий может иметь подобную величину Π при ограничении деформирования до $\varepsilon = 0,45$ ($\Pi = 0,58$, см. рис. 2, а); $\Pi = 0,63$ (см. рис. 2, в)) или до $\varepsilon = 0,4$ ($\Pi = 0,66$, см. рис. 2, б). Следует отметить, что приведенные расчетные характеристики амортизирующих свойств основаны на диаграмме $\sigma-\varepsilon$, поэтому исследование механических свойств высокопористых металлов имеет важное значение для расчетной оценки амортизирующих качеств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 08-08-00337-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ударные волны и экстремальные состояния вещества / Под ред. В.Е. Фортова, Л.В. Альтшулера, Р.Ф. Трунина, А.И. Фунтикова. — М.: Наука, 2000. — 425 с.
2. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. — М.: Наука, 1966. — 686 с.
3. Литые заготовки из пенистого алюминия / М.Б. Альтман, Б.А. Борок, В.А. Меркулов и др. // В кн.: Алюминиевые сплавы. Под ред. И.Н. Фридляндера. — М.: Оборонгиз, 1963. — Вып. 1. — С. 41–49.
4. Применение пенообразного алюминия в космическом кораблестроении / Пер. с англ. 64/13628. — М.: ГПНТБ, 1964. — 9 с.
5. Сионоя С. Пористый алюминий и его применение / Пер. с яп. 74/11416-В. — М.: ГПНТБ, 1973. — 11 с.

а протяженность участка с $E''_п = 0,9$ в 4,8 раза больше, чем у объемно-перфорированного сплава. Кроме эффективной энергии поглощения удара известен другой подход для количественной оценки амортизирующих свойств пеноалюминия, связанный с максимальным подъемом диаграммы $\sigma-\varepsilon$ в уплотнительно-пластической и пластической областях [5]:

$$\Pi = (\sigma_c - \sigma^*) / \sigma^*,$$

где σ_c — напряжение полного уплотнения пористого металла.

При расчете показателя амортизирующих свойств Π для ячеистого алюминия получено, что он изменяется от 1,7 (см. рис. 2, в) до 4,66 (см. рис. 2, а). В работе [5] отмечалось,

6. Фудзи К. Разработка сплавов пеноалюминия, более легких, чем древесина / Пер. с яп. 75/2294-B. – М.: ГПНТБ, 1974. – 12 с.
7. Thornton P. H., Magee C. L. The deformation of aluminium foams // Met. Trans. A. – 1975. – V. 6A. – No. 6. – P. 1253–1263.
8. Preface // Proc. 1-st Int. Conf. of Met. Foams and Porous Met. Struct. Bremen (Germany), 14–16 June 1999 (MetFoam'99). – Bremen, 1999. – P. 1–5.
9. Экспериментальная оценка определяющих уравнений высокопористых металлов / А.П. Гусаров, А.В. Жариков, В.А. Марков, А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев, В.В. Селиванов // Материалы XIV Междунар. симпоз. “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред” им. А.Г. Горшкова. Ярополец, 18–22 февраля 2008 г. Т. 2. – М.: МАИ, 2008. – С. 72–83.
10. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. Изд. 8-е, стереотипное. – М.: Наука, 1979. – 556 с.
11. Писаренко Г. С., Стрижало В. А. Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела. – Киев: Наук. думка, 1986. – 264 с.
12. Carrol M. M., Holt A. C. Static and dynamic pore-collapse relations for ductile porous materials // J. Appl. Phys. – 1972. – V. 43. – No. 4. – P. 1626–1636.
13. Взрывной метод калибровки пьезоэлектрических акселерометров с использованием пористых демпферов / Ю.В. Батьков, С.И. Бондаренко, Ю.А. Крысанов и др. // Докл. I Всесоюз. симпоз. по импульсным давлениям. Т. 1. – М., 1974. – С. 37–41.
14. Исследование особенностей распространения и отражения волн давления в пористой среде / Б.Е. Гельфанд, С.А. Губин, С.М. Когарко и др. // ПМТФ. – 1975. – № 6. – С. 74–77.
15. Гельфанд Б. Е., Губанов А. Б., Тимофеев Е. И. Взаимодействие воздушных ударных волн с пористым экраном // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1983. – № 4. – С. 54–69.
16. Гельфанд Б. Е., Сильников М. В. Барометрическое действие взрывов. – СПб: Астерион, 2006. – 658 с.
17. Машиностроение: терминологический словарь / Под общ. ред. М.К. Ускова, Э.Ф. Богданова. – М.: Машиностроение, 1996. – 592 с.
18. Головин С. А., Пушкарь А., Левин Д. М. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. – М.: Металлургия, 1987. – 190 с.
19. Никольский Л. Н., Кеглин Б. Г. Амортизаторы удара подвижного состава. – М.: Машиностроение, 1986. – 144 с.

Статья поступила в редакцию 24.06.2008

Селиванов В.В. родился в 1946 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1971 г. Д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, заведующий кафедрой “Высокоточные летательные аппараты” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 250 работ по механике сплошных сред и механике деформируемого твердого тела.

V.V. Selivanov (b. 1946) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1971. D. Sc. (Eng.), professor, Honored Science Worker of the Russian Federation, head of “High-Precision Flying Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 250 publications in the field of mechanics of continua and mechanics of deformable solid body.





Жариков А.В. родился в 1977 г. окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2000 г. Начальник бригады ОАО “ФГУП “ГНПП “Регион”, автор более 10 научных работ по механике деформируемого твердого тела и конечной баллистике.

A.V. Zharikov (b. 1977) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2000. Head of team in open joint-stock company “GNPP “Region”. Author of more than 10 publications in the field of mechanics of deformable solid body and ballistics in end point.



Марков В.А. родился в 1960 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1983 г. Заведующий лабораторией кафедры “Высокоточные летательные аппараты” МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор более 120 работ по механике сплошных сред и механике деформируемого твердого тела.

V.A. Markov (b. 1960) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1983. Head of laboratory of “High-Precision Flying Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 120 publications in the field of mechanics of continua and mechanics of deformable solid body.



Овчинников А.Ф. родился в 1927 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1957 г. Канд. техн. наук, профессор кафедры “Высокоточные летательные аппараты” МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор более 180 работ по механике сплошных сред, деформируемого твердого тела и эффективности конструкций.

A.F. Ovchinnikov (b. 1927) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1957. Ph. D. (Eng.), professor of “High-Precision Flying Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 180 publications in the field of mechanics of continua, mechanics of deformable solid body and efficiency of constructions.



Пусев В.И. родился в 1950 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1973 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Высокоточные летательные аппараты” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 120 работ по механике деформируемого твердого тела и механике сплошных сред.

V.I. Pusev (b. 1950) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1973. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “High-Precision Flying Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 120 publications in the field of mechanics of deformable solid body and mechanics of continua.



Сообшиков А.Н. родился в 1963 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1986 г. Генеральный директор ООО “Клуб Сервис”, автор 12 научных работ в области механики деформируемого твердого тела и сплошных сред.

A.N. Soobshchikov (b. 1963) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1986. General director of limited liability company “Klub Servis”. Author of 12 publications in the field of mechanics of deformable solid body and mechanics of continua.