

В. А. В е л д а н о в, В. А. М а р к о в,
В. И. П у с е в, А. М. Р у ч к о,
М. Ю. С о т с к и й, Ю. М. С о т с к и й,
С. В. Ф е д о р о в

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ АКСЕЛЕРОМЕТРИИ

Рассмотрено применение технологии пьезоакселерометрии для определения динамических механических свойств алюминиевых сплавов при скорости взаимодействия до 600 м/с ударников с конической формой головной части. Рассчитаны коэффициенты свойств среды для использования в экспериментально-теоретической методике и приведено сравнение экспериментальных и расчетных результатов.

E-mail: mva-2805@mail.ru

Ключевые слова: *алюминиевые сплавы, динамические механические свойства, пьезоакселерометрия.*

Частный вариант технологии пьезоакселерометрии, применяемой для определения зависимости от времени контактных сил и ускорений недеформируемого или малодеформируемого ударника при высокоскоростном проникании в полубесконечную среду, был приведен ранее в работах [1, 2]. Технология использовалась для установления динамических механических свойств песчаного грунта при скорости взаимодействия до 200 м/с ударников конической и плоской головными частями (ГЧ) [2]. Там же приведены алгоритм расчета коэффициентов свойств среды для экспериментально-теоретической методики и сравнение экспериментальных и расчетных результатов.

Настоящая работа связана с описанием технологии пьезоакселерометрии [3, 4], применяемой для определения истории замедления, т.е. зависимости отрицательных ускорений от времени [5], при проникании по нормали недеформируемого ударника в среду-мишень из алюминиевого сплава. Полученные результаты используются в экспериментально-теоретических исследованиях динамических механических свойств различных материалов [6], в том числе алюминиевых сплавов [7–9].

В технологии пьезоакселерометрии [3] применяется разгон ударника с датчиком в баллистической установке (БУ). Такая технология не обременена ограничениями [7, 8], связанными с получением и интерпретацией результатов измерений в условиях обращенного удара. При использовании обращенного метания мишени на стационарно размещенную измерительную систему существенными становятся вопросы тождественности результатов регистрации, полученных в смоделиро-

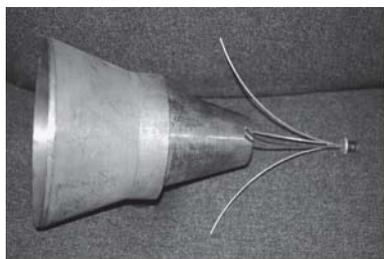
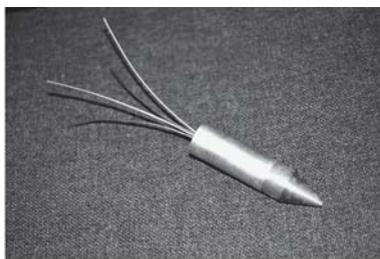
*а**б*

Рис. 1. Внешний вид базовых вариантов конструкций токосъемника (слева) и проводника разработанного устройства (*а*) и вариант конструкции исследуемого ударника в сборе с разработанным акселерометром и проводником устройства контактной электрической связи регистрирующей аппаратуры с ударником (*б*)

ванном процессе и в случае прямого удара. Поскольку размеры мишеней, реализуемых в таких экспериментах, малы в осевом направлении (направлении удара), то невозможно регистрировать процессы полного проникания ударника в мишень и ограничиваются лишь данными о значении импульса силы при пробитии тонких алюминиевых мишеней [7, 9]. В результате исследования влияния соотношения масс ударника и метаемого объема среды [5] выявили, что регистрацию данных можно проводить с допустимой погрешностью только при отношении масс метаемой мишени и ударника, равном 40 и более. Это происходит из-за смягчения ударного процесса вследствие потери скорости метаемой мишенью, что выражается в уменьшении амплитуды ударного импульса и увеличении его протяженности во времени.

Для исследования проникания ударника в мишень с применением высокоскоростной фотосъемки разработано устройство контактной электрической связи с ударником [3] (рис. 1, *а*). Для его применения предусмотрена измерительная сборка, приведенная на рис. 1, *б* и рис. 2. В базовом варианте исполнения устройства токосъемник выполняется со сменным выходным элементом из пластически деформируемого материала, а проводники — из упругого материала, обеспечивающего сохранность при их контакте с токосъемником в диапазоне скоростей встречи ударника с мишенью, предусмотренных в опытах. Проводники упруго деформируются при размещении метаемой измерительной сборки в БУ и восстанавливают свою первоначально заданную форму после выхода из БУ в силу своих конструктивных упругих характеристик и при действии потока разгоняющей среды (газов), который создает силы, действующие на проводники в направлении, ортогональном траектории движения ударника на участке его перемещения от БУ к токосъемнику. К началу замыкания первоначально заданная форма проводников восстанавливается. Вследствие взаимодействия упругого проводника с неподвижной поверхностью

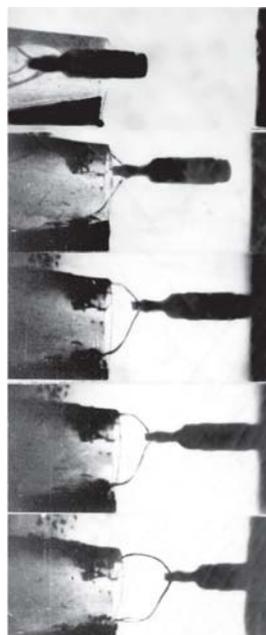
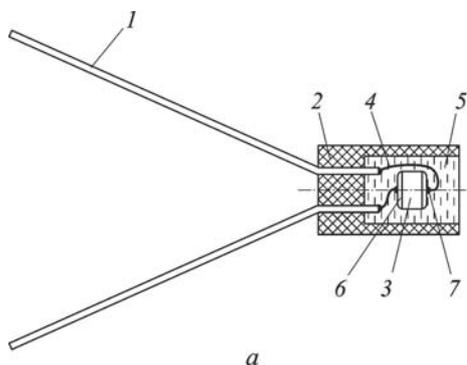


Рис. 2. Схема измерительной сборки (проводник–акселерометр) для крепления с исследуемым ударником (*а*) и кадры высокоскоростной (125 000 кадров/с) оптической съемки функционирования элементов устройства контактной электрической связи в токосъемнике (*б*) (начало процесса – фото сверху):

1 – проводник; 2 – изолятор; 3 – пьезоэлемент; 4 – соединительный провод; 5 – эпоксидный компаунд; 6 – электрические обкладки; 7 – точки крепления элементов сборки

токосъемника под углом к ней и при движении измерительной сборки внутри токосъемника к преграде обеспечивается непрерывный контакт проводников с токосъемником и создаются условия безударного точечного начала контактирования и дальнейшего непрерывного контактирования во всем требуемом периоде поддержания режима замыкания. Наблюдаемые в опытах остаточные следы воздействия проводников на поверхность токосъемника в виде деформационных следов (царапин, вмятин) служат подтверждением режима замыкания. К началу периода замыкания вершина ГЧ ударника находится в непосредственной близости от лицевой поверхности мишени, поскольку выставлено необходимое расстояние между токосъемником и преградой. На рис. 2, б показаны кадры высокоскоростной оптической съемки функционирования устройства [3] в опыте с моделью токосъемника, выполненной из оптически прозрачного материала.

Высокая электрическая активность пьезокерамик из цирконата-титаната свинца [10, 11] позволила предложить конструкцию [3] и отработать пьезоакселерометр серии А2М, выполненный на основе дискового чувствительного элемента из пьезокерамики ЦТС-19 с электропроводящими обкладками. Специально проведенные тесты пока-

зали существенное превышение генерируемого пьезоакселерометром серии А2М электрического заряда над электрическими помехами от скользящего контакта проводника с токосъемником. Опыт применения пьезоакселерометров серии А2М позволил выявить диапазон рабочих давлений, воздействующих на чувствительный элемент при проникании ударника в алюминиевые сплавы со скоростями до 600 м/с. Максимальные реализуемые при функционировании таких пьезоакселерометров давления в 3 раза меньше давлений, возникающих при статическом разрушении пьезокерамики [10, 11], и почти на порядок меньше давлений разрушения чувствительного элемента при его динамическом нагружении в условиях, аналогичных реальным условиям функционирования элемента. На рис. 3, *а* показана схема проведения теста на вертикальном копре с измерением давлений в штемпельном приборе, содержащем чувствительный элемент из ЦТС-19; на рис. 3, *б* – результаты последовательных замеров регистрируемого импульса давления в крешерном приборе.

Осциллограммы, приведенные на рис. 4, *а* и *в*, в опытах получены на осциллографе С8-9 при использовании согласующего устройства с сопротивлением входа более 100 МОм. Для апробированного пьезоакселерометра серии А2М коэффициент преобразования равен $\sim 0,0015 \text{ мВ} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^{-1}$ с масштабной емкостью 68 нФ; масштаб осциллограмм по напряжению составляет 20 В/см; собственная частота пьезо-

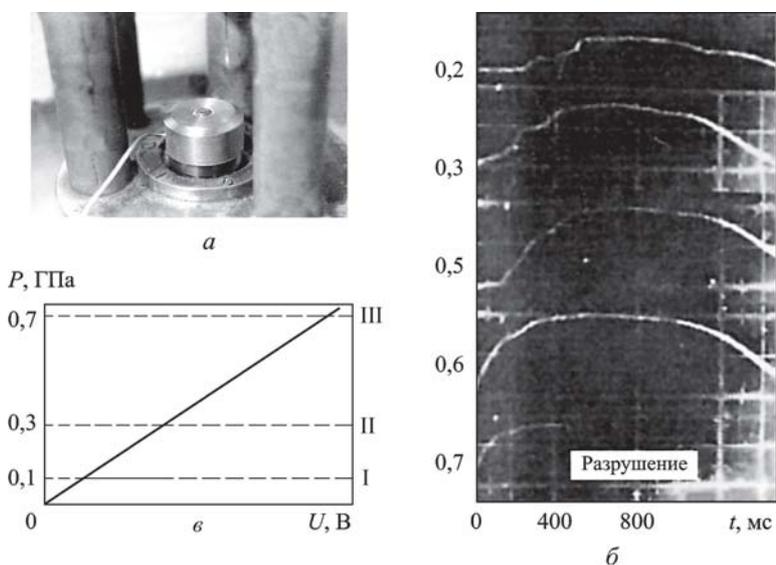
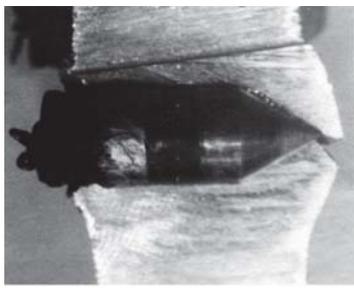
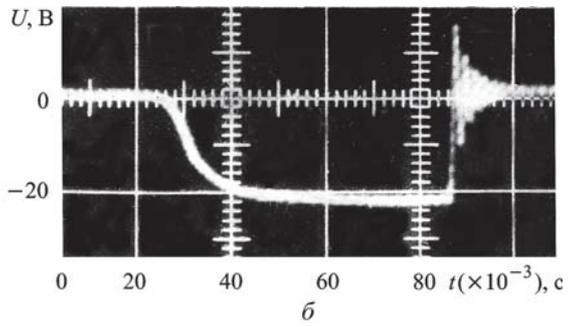


Рис. 3. Тестирование акселерометров:

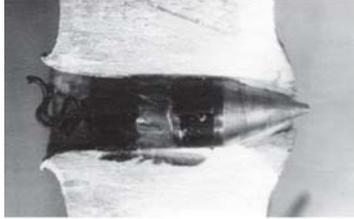
а – штемпельный прибор для исследования давлений разрушения акселерометра; *б* – результаты регистрации электрических сигналов от пьезоэлемента в крешерном приборе; *в* – амплитудная характеристика акселерометра; штриховые прямые – уровни давлений (I – максимальные рабочие давления на пьезоэлемент; II и III – максимальные давления разрушения статические и в условиях динамического сжатия соответственно)



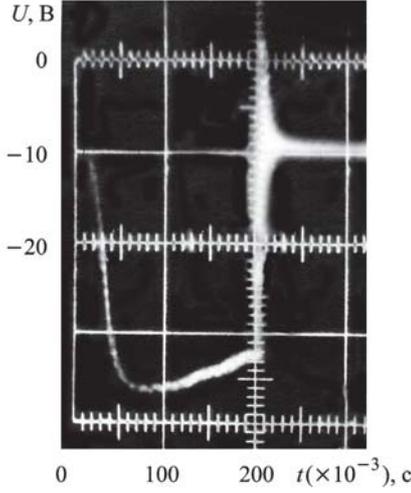
a



б



в



з

Рис. 4. Взаимодействие малодеформируемого ударника из стали 35ХГСА с мишенью из алюминиевого сплава при начальных скоростях удара 475 м/с (*a, б*) и 534 м/с (*в, з*):

a, в — разрез преграды толщиной 60 мм из алюминиевого сплава в результате взаимодействия с измерительной сборкой (диаметр ударника 23 мм; масса ударника 0,135 кг (*a*) и 0,138 кг (*в*); масса ударника с проводником 0,15 кг (*a*) и 0,169 кг (*в*); угол при вершине ГЧ 60° (*a*) и 45° (*в*); *б, з* — осциллограммы замедления недеформируемого ударника в мишени

акселерометра в закрепленном состоянии 115 кГц. Метрологический анализ измерения параметров ударных нагрузений с применением пьезоакселерометров подробно приведен в работах [10–12]. Для указанных условий проведения опытов и регистраций доверительный интервал результата измерений [5] составляет 12...15% при доверительной вероятности 0,95. Это означает, что результаты измерений не выходят за пределы двух-трех толщин следа луча на осциллограмме. История замедления ударника регистрируется в течение 80 мкс (рис. 4, *a, б*) и 200 мкс (рис. 4, *в, з*). На осциллограммах (см. рис. 4, *б* и *з*) зафиксировано замыкание измерительной цепи в указанные моменты времени в виде гармонических затухающих колебаний амплитуды регистрируемого сигнала. Разрезы мишени с внедрившимся в нее ударником (см. рис. 4, *a* и *в*) свидетельствуют об изменении форм про-

водников в процессе проникания в мишень и при контакте их с материалом мишени, вызывающим электрическое замыкание. Для регистрации истории замедления ударника до окончания процесса проникания при начальных условиях встречи ударника с мишенью, реализованных в опытах, следует использовать предложенный в работе [3] модернизированный вариант устройства с малодеформируемыми проводниками и пластически деформируемым токосъемником. Установлено, что реализованный в опытах базовый вариант устройства позволяет регистрировать замедление ударника до окончания процесса проникания в мишень из алюминиевого сплава при скорости встречи менее 330 м/с. Данные о динамических механических свойствах материалов мишени, получаемые с использованием осциллограмм (см. рис. 4, б и з), формально справедливы в диапазоне от начальной скорости встречи до скорости ударника в момент замыкания.

При исследовании процесса проникания ударника в мишень с помощью инженерных (экспериментально-теоретических) методик опытным путем получают данные о динамических механических свойствах материалов ударников и сред, законах сопротивления и значениях используемых в них коэффициентов свойств среды. В результате обработки экспериментальных данных [13, 14] выявили, что динамическое сопротивление среды прониканию ударника зависит от удельных нормальных (σ_n) и касательных (τ_n) сопротивлений в точках на поверхности ГЧ ударника и на контактирующих со средой боковой и донной частях ударника.

При использовании подхода, реализованного в работах [2, 4], была определена зависимость $\sigma_n(v_n)$, аппроксимируемая в виде

$$\begin{aligned}\sigma_n &= Av_n^2 + Bv_n + C; \\ \tau_n &= \mu\sigma_n,\end{aligned}\tag{1}$$

где A, B, C — коэффициенты, зависящие от физико-механических свойств среды; v_n — нормальная составляющая скорости проникания; μ — коэффициент поверхностного трения ударника о среду.

С использованием приведенных ранее технологий были исследованы динамические механические свойства как типовых алюминиевых сплавов (Д16 и АМг), так и алюминиевого сплава с повышенными прочностными и вязкостными свойствами, содержащего магний и цинк. Обработав осциллограммы, полученные при проникании в алюминиевый сплав, содержащий магний и цинк, ударников с конической ГЧ (с углами от 30° до 90°) для скоростей, не превышающих 600 м/с, при $\mu = 0,001$ нашли следующие значения коэффициентов (1):

$$A = 2700 \text{ кг/м}^3, \quad B = 0, \quad C = 900 \text{ МПа},\tag{2}$$

что указывает на наличие в выражении удельного сопротивления (1) только двух составляющих.

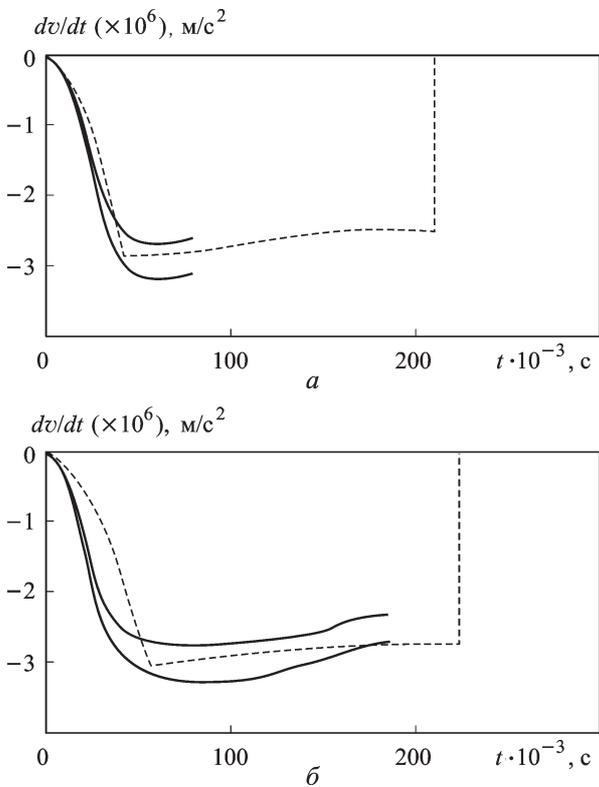


Рис. 5. Сравнение расчета замедления ударника при проникании в мишень из алюминиевого сплава (штриховая) с экспериментом (сплошная) для опыта на рис. 4, а (а) и рис. 4, в (б)

На рис. 5 штриховой кривой показаны результаты расчета для ударника и условий его взаимодействия с алюминиевым сплавом, соответствующих условиям опытов, приведенных на рис. 4. Верхняя и нижняя границы доверительного интервала результатов измерений в опытах ограничены сплошными кривыми (см. рис. 5).

Опытным путем регистрируется более раннее замедление. Это объясняется лицевым выдавливанием материала мишени. Площадь контакта ГЧ ударника с материалом мишени растет более интенсивно по сравнению с площадью контакта, определенной в результате расчета, при котором это выдавливание не учитывается. Снижение замедления после прохождения максимума в опыте более интенсивное, чем в расчете, так как расчет проводится для полубесконечной мишени. В опыте мишень имеет конечную толщину и ударник испытывает меньшее сопротивление при движении в тыльных слоях мишени. Отмечено совпадение по максимальному замедлению.

Закон удельного сопротивления (1) с найденными коэффициентами позволяет решать задачи пространственного проникания, которое имеет место при взаимодействии ударников с преградой под или с углом атаки.

Результаты измерений, проведенных с помощью пьезоэлектрических акселерометров, и их обработка по представленному алгоритму позволяют не только определять динамические характеристики сопротивляемости различных материалов прониканию ударника и деформированию, но также дают возможность тестировать расчетные методики и уточнять их, в том числе для задач численного моделирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 08-08-00341а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент 2287756 РФ. Устройство проводной электрической связи для метаемого тела и способ испытаний метаемых тел с непрерывной регистрацией баллистических параметров / А.Ю. Васильев, В.А. Велданов, А.М. Ручко, М.Ю. Сотский / Патентообладатель: НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Оpubл. 20.11.2006. Бюл. № 32.
2. Исследование проникания недеформируемых ударников в песчаный грунт на основе технологии акселерометрии / В.А. Велданов, А.В. Жариков, В.А. Марков и др. // Материалы XV Междунар. симп. Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред им. А.Г. Горшкова. Ярополец, 16–20 февраля 2009 г. Т. 1. – М.: Изд-во “Типография “ПАРАДИЗ”, 2009. – С. 40–41.
3. Патент 2297619 РФ. Устройство контактной связи, установка и способ проведения испытаний с непрерывной регистрацией параметров конечной баллистики метаемых тел / А.Ю. Васильев, А.В. Жариков, А.М. Ручко, М.Ю. Сотский, Ю.М. Сотский. Оpubл. в 2007. Бюл. № 11.
4. Исследование динамических механических свойств песчаного грунта методом акселерометрии / В.А. Велданов, А.В. Жариков, В.А. Марков и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. Спец. выпуск. – 2008. – С. 79–87.
5. Ручко А. М., Сотский М. Ю. Оценка достоверности результатов регистрации истории замедления конструкции в процессе контактного взаимодействия // Материалы XII Междунар. симп. Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Ярополец, 13–17 февраля 2006 г. Тез. докл. – М.: Изд-во МАИ, 2006. – С. 274–275.
6. Сотский М. Ю. Опыт использования непрерывной регистрации истории нагружения ударников для тестирования динамических контактных задач // Материалы XII Междунар. симпоз. Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Тез. докл. – М.: Изд-во МАИ, 2006. – С. 286–287.
7. Степанов Г. В., Сафаров Э. Г. Импульс сил при пробивании тонких пластин // Проблемы прочности. – 1988. – № 10. – С. 95–98.
8. Экспериментально-расчетный анализ высокоскоростного деформирования алюминиевого сплава АМг6 / А.В. Абрамов, А.М. Брагов, А.Ю. Константинов и др. // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2004. – Вып. 66. – С. 93–100.
9. Virostec S. P., Dual J., Goldsmith W. Direct force measurement in normal and oblique impact of plates by projectiles // Int. J. Impact Engng. – 1987. – Vol. 6. – No. 4. – P. 247–269.
10. Баженов А. А., Лобастов С. А., Яровиков В. И. Пьезоэлектрические датчики для измерения параметров взрывных и ударных нагружений. Ч. 1 // Метрология. – 2003. – № 10. – С. 25–35.

11. Баженов А. А., Лобастов С. А., Яровиков В. И. Пьезоэлектрические датчики для измерения параметров взрывных и ударных нагрузений. Ч. 2 // Метрология. – 2003. – № 11. – С. 19–32.
12. Измерение параметров вибрации и удара / В.С. Шкаликов, В.С. Пеллинец, Е.Г. Исаакович и др. – М.: Стандарты, 1980. – 340 с.
13. Велданов В. А., Сотский М. Ю. Параметры регистраций замедления ударника и их взаимосвязь с коэффициентами в законах сопротивления прониканию // Материалы IX Междунар. симпоз. Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Ярополец, 14–18 февраля 2005 г. Т. 1. Тез. докл. – М.: Изд-во МАИ, 2005. – С. 14–15.
14. Велданов В. А., Исаев А. Л., Маринчев Д. В., Пушилин Ю. М. Программа расчета на ЭВМ параметров процесса взаимодействия ударника с преградой // Материалы XXII Всесоюз. конф. Численные методы решения задач теории упругости и пластичности. – Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1992. – С. 65–72.

Статья поступила в редакцию 3.09.2009

В.А. Велданов родился в 1945 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1968 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Высокоточные летательные аппараты” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 работ в области конечной баллистики и механики твердого тела.



V.A. Veldanov (b. 1945) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1968. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “High-precision Flying Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of terminal ballistics and mechanics of solid body.

В.А. Марков 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.

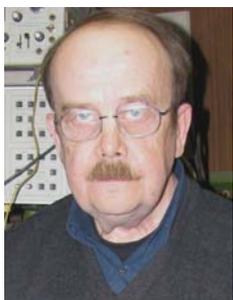


V.A. Markov (b. 1960) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1973. Head of laboratory of “High-precision Flying Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 120 publications in the field of mechanics of continua and mechanics of deformable solid body.

В.И. Пусев 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.



А.М. Ручко родился в 1941 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1968 г. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела СМ2-1 НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 120 работ по механике деформируемого твердого тела и механике сплошных сред.

A.M. Ruchko (b. 1941) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1968. Ph. D. (Eng.), senior researcher of Special Machinery Research Institute 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.



М.Ю. Сотский родился в 1948 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1972 г. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела СМ2-1 НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 120 работ по механике деформируемого твердого тела и механике сплошных сред.

M.Yu. Sotskii (b. 1941) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1972. Ph. D. (Eng.), senior researcher of Special Machinery Research Institute 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.



Ю.М. Сотский родился в 1981 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2004 г., заместитель начальника конструкторского бюро ЗАО “Интеллектуальные технологии”. Автор пяти научных работ в области технологий обеспечения непрерывности электрической связи с объектом.

Yu.M. Sotskii (b. 1981) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2004. Deputy head of design bureau of “Intellectual Technologies” closed corporation. Author of 5 publications in the field of technologies of providing the continuous electrical connection with object.



С.В. Федоров родился в 1964 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1987 г., МГУ им. М.В. Ломоносова в 1992 г. Старший преподаватель кафедры “Высокоточные летательные аппараты” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 работ по механике деформируемого твердого тела и механике сплошных сред.

S.V. Fedorov (b. 1964) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1987 and the Lomonosov Moscow State University in 1992. Senior teacher of “High-precision Flying Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 publications in the field of mechanics of deformable solid body and mechanics of continua.