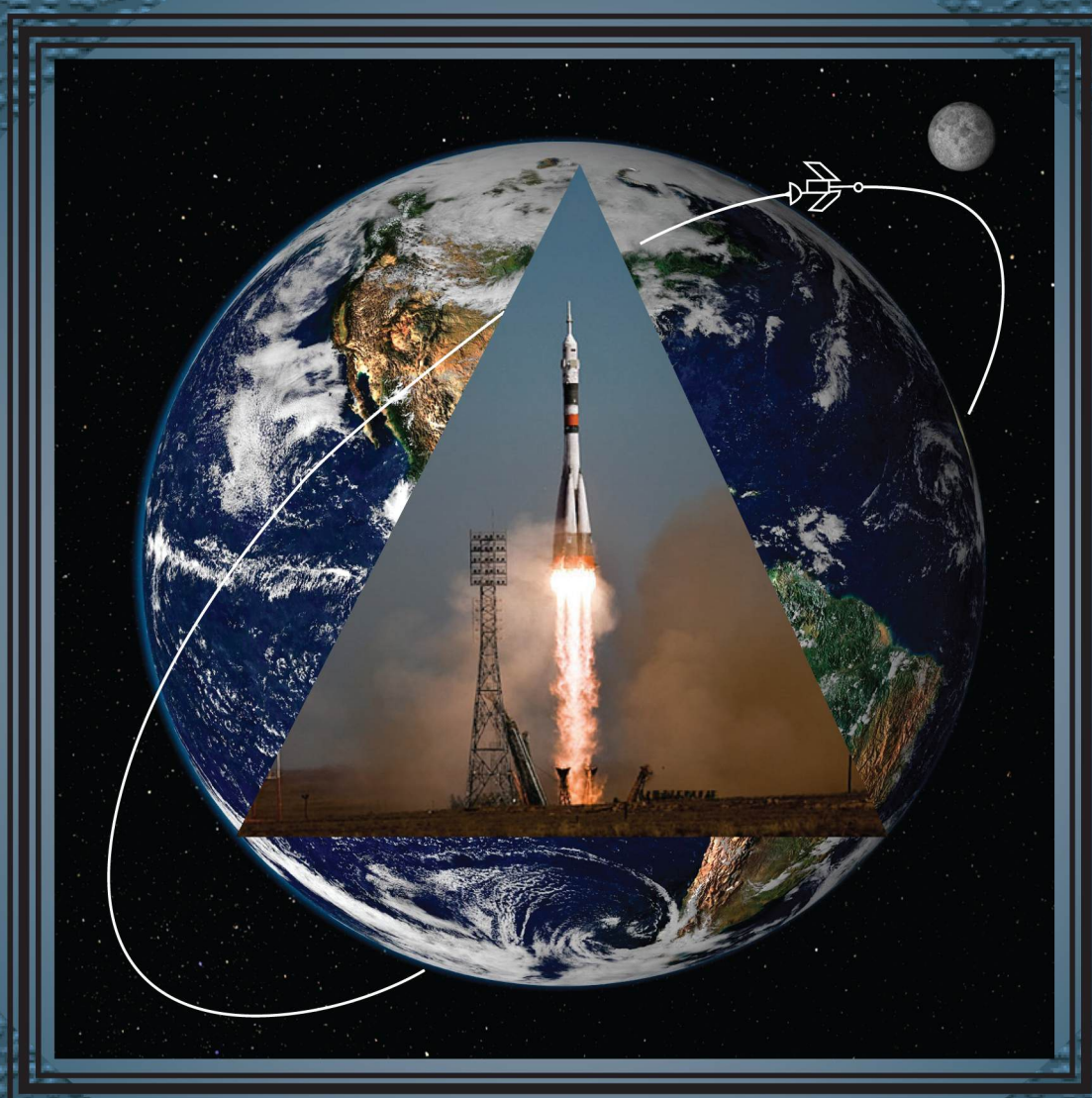


КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

4



Москва 2023



Все новейшие достижения и современные разработки предприятий оборонного комплекса — в научно-технических журналах ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас» является издателем следующих научных журналов:



Межотраслевой научно-технический журнал
Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России
(4 выпуска)
Подписной индекс **79379**
Издается с 1984 года



Межотраслевой научно-технический журнал
Конструкции из композиционных материалов
(4 выпуска)
Подписной индекс **80089**
Издается с 1981 года



Научно-технический журнал
Информационные технологии в проектировании и производстве
(4 выпуска)
Подписной индекс **79378**
Издается с 1976 года



Межотраслевой научно-практический журнал
Экология промышленного производства
(4 выпуска)
Подписной индекс **80090**
Издается с 1993 года



Научно-практический журнал
Вопросы защиты информации
(4 выпуска)
Подписной индекс **79187**
Издается с 1974 года

Все издания ФГУП "Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»:

✓ включены решением ВАК Министерства науки и высшего образования России в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук;

✓ метаданные выпусков включены в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Более подробную информацию об изданиях, подписке, дополнительных услугах можно получить по тел.: 8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-67, 8 (495) 491-77-20 (подписка);
факс: 8 (495) 491-44-80.
E-mail: izdanie@ntckompas.ru

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ОБОРОННОГО КОМПЛЕКСА "КОМПАС"»

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАКЕТНЫЙ ЦЕНТР имени АКАДЕМИКА В. П. МАКЕЕВА»

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ»
имени АКАДЕМИКА М. Ф. РЕШЕТНЕВА»

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Орган Научного совета РАН по механике
конструкций из композиционных материалов

Выпуск 4 (172)

Издается с 1981 г.

Москва 2023

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ, ПРОЦЕССОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Пегов В. И., Мошкин И. Ю. Определение давления на
тонкостенные цилиндрические оболочки из компози-
ционных материалов при многофазном обтекании..... 3

Мокин Ю. А., Калашиников С. Т., Швалева Р. К. О модели-
ровании аэродинамического коэффициента сопротив-
ления тела вращения с малыми искажениями поверх-
ности композитного теплозащитного покрытия при
сверхзвуковом обтекании..... 11

Валов И. И., Калашиников С. Т. Об инженерном методе
расчета аэродинамических характеристик вертолет-
ного винта из композиционного материала..... 18

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ

Трофимов Д. А., Симонов-Емельянов И. Д., Шалгунов С. И.,
Соколов В. И. Алгоритм расчета эффективных упругих
характеристик анизотропных структур армированных
пластиков с использованием программных комплексов
САЕ..... 22

Мокин Ю. А., Калашиников С. Т., Швалева Р. К. Оценка
дисперсии производных коэффициента аэродинамиче-
ского сопротивления по углам атаки и скольжения

тела вращения с малыми случайными искажениями
поверхности композитного теплозащитного материала
при сверхзвуковом обтекании..... 28

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И СОЕДИНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

Андрюшин К. П., Дудкина С. И., Шилкина Л. А., Нагаен-
ко А. В., Андрюшина И. Н., Хасбулатов С. В., Резни-
ченко Л. А. Влияние метода изготовления интеллекту-
альных композиционных материалов для частотно-
селективных устройств на формирование корреляци-
онных связей "элементный состав — фазовая струк-
тура — макроотклики"..... 34

Кованов А. Е., Артёмов А. А., Степанов Н. В. Технологи-
ческие особенности механической обработки сотового
заполнителя и исследование их влияния на качество
сотовой структуры..... 41

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Дудкина С. И., Андрюшин К. П., Шилкина Л. А., Андрю-
шина И. Н., Вербенко И. А., Резниченко Л. А. Влияние
физико-химического состояния пентаоксида ниобия на
свойства композиционных ниобатных материалов
(Обзор)..... 46

Главный редактор В. Г. Дегтярь, акад. РАН, д-р техн. наук,
генеральный директор, генеральный конструктор АО «ГРЦ Макеева»

Заместитель главного редактора Н. А. Тестоедов, акад. РАН, д-р техн. наук,
генеральный конструктор АО «ИСС»

Ответственный секретарь Е. И. Андреева,
ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

Редакционная коллегия:

А. В. Беляков, д-р хим. наук, проф., РХТУ им. Д. И. Менделеева; **А. А. Боков**, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет им. Саймона Фрайзера, Канада; **О. Н. Будадин**, д-р техн. наук, проф., АО «ЦНИИСМ»; **С. В. Бухаров**, д-р техн. наук, проф., МАИ (НИУ); **В. В. Васильев**, акад. РАН, д-р техн. наук, ИПМ РАН; **В. Г. Дмитриев**, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., ФГУП "ЦАГИ"; **С. Т. Калашиников**, канд. техн. наук, АО "ГРЦ Макеева"; **А. Л. Каменева**, д-р техн. наук, доцент, ПНИПУ; **А. Н. Лихачев**, д-р техн. наук, проф., БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова; **Е. С. Лукин**, д-р техн. наук, проф., РХТУ им. Д. И. Менделеева; **С. А. Оглезнева**, д-р техн. наук, доцент, ПНИПУ; **А. В. Острик**, д-р техн. наук, проф., ИПХФ РАН; **Л. А. Резниченко**, д-р физ.-мат. наук, проф., НИИ физики ЮФУ; **С. Б. Сапожников**, д-р техн. наук, проф., НОЦ "Нанотехнологии" ЮУГУ; **Б. С. Сарбаев**, д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н. Э. Баумана; **И. Д. Симонов-Емельянов**, д-р техн. наук, проф., МИРЭА-Российский технологический университет (ИТХТ им. М. В. Ломоносова); **А. Н. Тимофеев**, д-р техн. наук, ОАО "Композит"; **В. И. Халиманович**, канд. физ.-мат. наук; проф., АО "ИСС"; **В. И. Хлыбов**, д-р физ.-мат. наук, АО "ГРЦ Макеева"; **Б. В. Щетанов**, д-р техн. наук, проф., ФГУП "ВИАМ" ГНЦ РФ

Тел. (495) 491-77-67
E-mail: izdanie@ntckompas.ru

Перепечатка материалов и использование их в любой форме, в том числе электронной, без предварительного письменного разрешения редакции не допускаются.

- © Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас» (ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»), 2023;
- © Акционерное общество «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева» (АО «ГРЦ Макеева»), 2023;
- © Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» (АО «ИСС»), 2023

УДК 629.76/78.001.63

DOI: 10.52190/2073-2562_2023_4_3

EDN: AALOHV

Определение давления на тонкостенные цилиндрические оболочки из композиционных материалов при многофазном обтекании

^{1, 2} В. И. ПЕГОВ, д-р техн. наук; ¹ И. Ю. МОШКИН, канд. техн. наук

¹ Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
г. Миасс, Челябинская обл., Россия

² АО «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева»,
г. Миасс, Челябинская обл., Россия

Рассмотрен один из проблемных вопросов определения давления при кавитационном обтекании ракеты. Приведена методика, позволяющая численно моделировать формы каверн, определять особенности многофазного обтекания, а также рассчитывать гидродинамические нагрузки и гидродинамические характеристики изделий из композиционного материала (КМ) при кавитационном обтекании его вертикальным потоком воды. Приведены сравнения расчетов и экспериментальных исследований. Показана возможность использования разработанного метода для определения гидродинамических характеристик изделий при многофазном обтекании.

Ключевые слова: многофазное обтекание, гидродинамика, газожидкостный слой, нестационарное обтекание, кавитационное течение, гидродинамические характеристики, гидродинамические нагрузки.

При проектировании ракет проблема устойчивости тонкостенных цилиндрических оболочек из КМ, находящихся при подводном движении в условиях нагружения внешним давлением и осевыми сжимающими усилиями, была успешно решена, в том числе и с помощью снижения гидродинамических нагрузок на ракету при подводном движении за счет многофазного обтекания.

Для снижения гидродинамических нагрузок на ракету используют эффект кавитации. В данной статье изложены результаты исследований кавитационного обтекания в вертикальном потоке жидкости. Особенности каверн, образующихся в результате обтекания, обусловлены геометрией, изменением гидростатики при вертикальном движении, расходами энергосистемы. Каверна надувается газами порохового аккумулятора давления, поступающими в жидкость через газоходы в обтюраторе, и продуктами сгорания газогенератора, сопла которого выведены под кавитирующий насадок.

При большой скорости движения тела вращения под водой возникает кавитация корпуса: у стенок обтекаемого тела вследствие местного понижения давления в потоке происходит вскипание воды.

Газовые каверны на теле формируются также при прохождении им образующихся при старте газовых полостей или искусственным путем за счет подачи в область разрежения на теле воздуха или иного газа. С возникновением кавитации нарушается сплошность потока и изменяется силовое воздействие жидкости на тело. При совпадении направления силы тяжести и направления нисходящего вертикального потока возникают новые закономерности кавитационных течений, а образующиеся при этом каверны носят название вертикальных каверн [1].

При движении с большой скоростью изделия под водой за счет резкого сокращения зоны его контакта с жидкостью значительно уменьшается сопротивление внешней среды движению изделия. Именно этот выигрыш в сопротивлении позволяет изделию развивать в водной среде значительную скорость, поэтому необходимо всесторонне исследовать эффект кавитации в течениях на разных стадиях траектории изделия: разгонного движения с ускорением, маршевого движения с постоянной скоростью, взаимодействия изделия с преградой [2, 3].

С математической точки зрения механизм взаимодействия течений в многофазных средах чрезвычайно сложен: нестационарные многофазные процессы происходят в динамически изменяющихся многосвязных областях; отсутствуют математически выверенные постановки физических задач, существенная многомерность пространств решений порождает вычислительные проблемы [4, 5].

Пегов Валентин Иванович, главный научный сотрудник, профессор.

E-mail: ofpat@mail.ru, src@makeyev.ru

Мошкин Игорь Юрьевич, научный сотрудник.

E-mail: ofpat@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12 мая 2023 г.

© Пегов В. И., Мошкин И. Ю., 2023

Приближенный расчет кавитационного обтекания ракеты можно провести методом плоских сечений. Метод нашел широкое применение в теории глиссирования, развитой Г. В. Логвиновичем [6, 7]. В рамках этого метода Э. В. Парышевым рассмотрена задача о нестационарном глиссировании цилиндра в сужающейся части тесной каверны.

Согласно гипотезе Г. В. Логвиновича о независимом расширении поперечных сечений, задачу о кавитационном обтекании ракеты под углом атаки можно свести к плоской гидродинамической задаче отдельно для каждого сечения.

Развитие принципа независимости расширения на неосесимметричные случаи с помощью метода возмущений проведено в работах [8—10]. Однако этот метод нельзя использовать в том случае, когда в потоке жидкости, кроме каверны, присутствует еще и тело, имеющее твердые границы, например корпус ракеты за кавитатором. Конкретное поперечное сечение каверны может либо пересекаться с телом, либо нет или содержать его внутри себя. В общем случае это приводит к решению математической задачи в области достаточно сложной геометрической формы.

Расчет формы и положения поперечных сечений с учетом наличия твердого тела может осуществляться в этом случае методом конформных отображений. Распределенные гидродинамические нагрузки определим по полю давления, полученному из решения плоской задачи.

На рис. 1 показаны возможная геометрическая конфигурация, представляющая собой профиль меридионального сечения каверны, и одно из поперечных сечений, отстоящее на расстоянии z от кавитатора.

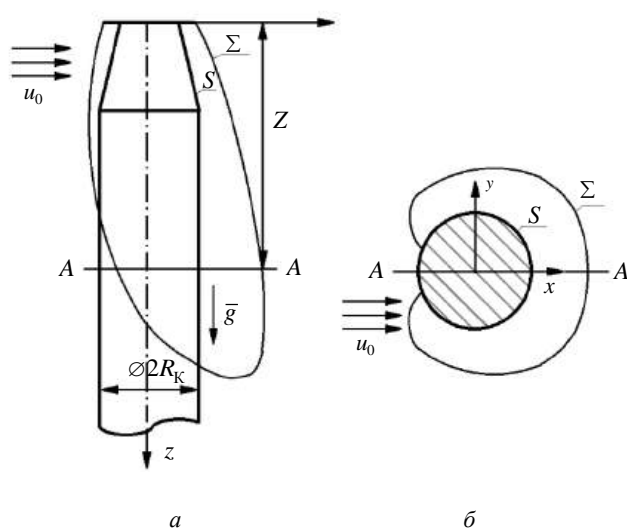


Рис. 1. Профиль меридионального сечения каверны и одно из поперечных сечений:

a — меридиональное сечение; b — поперечное сечение

Согласно принципу независимости расширения, это сечение развилось из круга, пробитого кавитатором в момент прохождения данного слоя жидкости, под влиянием двух факторов: расширения и сноса. Закон расширения (зависимость площади от времени) будем считать известным из формул Г. В. Логвиновича. Тогда, в соответствии с принципом независимости расширения, течение жидкости в каждом поперечном сечении потока следует считать плоским. Это в большой степени облегчает решение гидродинамической задачи, поскольку трехмерная задача сводится к последовательности плоских нестационарных гидродинамических задач с переменной границей области.

Но при определении поля давления имеется принципиальное затруднение, связанное с предположением о плоскопараллельном течении. Из-за переменности площади поперечных сечений каверны потенциал скорости на большом расстоянии и его производная по времени, а также давление возрастают по логарифмическому закону. Это противоречие, как и обычно при использовании метода плоских сечений, может быть преодолено только путем добавочных предположений относительно поведения потенциала скорости на больших расстояниях, где он уже не описывается решением плоской гидродинамической задачи.

Расчет эволюции поперечных сечений каверны в процессе их сноса боковым течением предполагает знание закона расширения или просто формы осесимметричной каверны. Она зависит от числа кавитации и для весомой жидкости — от числа Фруда. Приближенная теория Г. В. Логвиновича дает простую формулу для вида осесимметричной каверны.

Введем декартову систему координат $Oxyz$ так, что ее начало совпадает с центром кавитатора, а ось Oz направлена по оси симметрии в направлении силы тяжести. Тогда зависимость числа кавитации от расстояния до кавитатора задается формулой

$$\sigma(z) = \sigma(0) + \frac{1}{Fr^2} \left(\frac{z}{R_k} \right),$$

где $\sigma(0)$ — число кавитации на уровне кавитатора;

R_k — радиус кавитатора;

$Fr = W_0 / \sqrt{29R_k}$ — число Фруда;

W_0 — скорость кавитатора.

Форма каверны зависит от $\sigma(0)$ и Fr

$$\bar{R}(z) = \sqrt{1 + \bar{z} - 0,31\sigma(0)\bar{z}^2 - \bar{z}^3 / (10Fr^2)} \quad (1)$$

Эта формула отличается от известной формулы Г. В. Логвиновича учетом влияния числа Фруда.

Полагая в ней $\bar{R}=1$ и определяя положительный корень квадратного уравнения, получим следующее выражение для длины каверны:

$$\bar{L} = \sqrt{2,4Fr^4\sigma(0) + 10Fr^2 - 1,55Fr^2\sigma(0)}. \quad (2)$$

Расчет формы осесимметричной каверны по формуле (1) показывает не только качественное, но и хорошее количественное совпадение в пределах 10 %, если сравнивать с некоторыми случаями численного расчета (рис. 2).

В поперечных сечениях, перпендикулярных оси симметрии, постановка плоской гидродинамической задачи показана на рис. 3.

Ось Ox направлена по вектору скорости сноса бокового течения u_0 , а ось Oy — перпендикулярно к ней. В силу симметрии течения относительно оси Ox показана только верхняя половина. Круг BCE представляет собой поперечное сечение корпуса ракеты радиуса R_0 . Линия CD — поперечное сечение каверны. В какой-либо определенный момент времени t потенциал скорости $\varphi(x, y, t)$ должен

удовлетворять уравнению Лапласа во внешней области по отношению к контуру BCD и граничным условиям: нормальная скорость равна нулю на корпусе ракеты и на оси Ox (AB, DA), т. е. $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$ на BC, AB, DA ; на границе каверны CD задано значение потенциала скорости $\varphi = f$.

На большом удалении поток должен иметь скорость u_0 , поэтому потенциал должен стремиться к значению u_0x : $\varphi \rightarrow u_0x$ при $\sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \infty$.

Этих условий достаточно для определения потенциала скорости, но площадь сечения каверны при этом будет оставаться постоянной, если поток считать регулярным на бесконечности. Поэтому наложим дополнительно течение от источника переменной по времени интенсивности, который будет отвечать за изменение площади поперечных сечений каверны. Будем считать, что закон изменения площади сечений известен и вытекает из формулы (1).

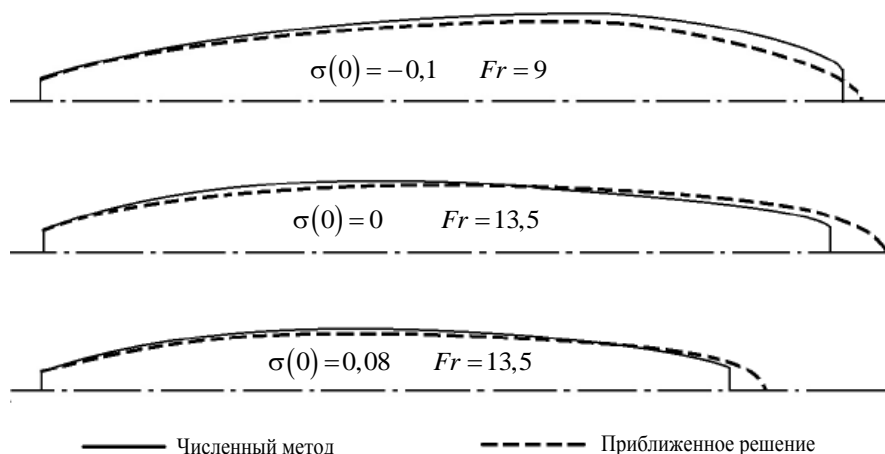


Рис. 2. Сравнение рассчитанных профилей каверны

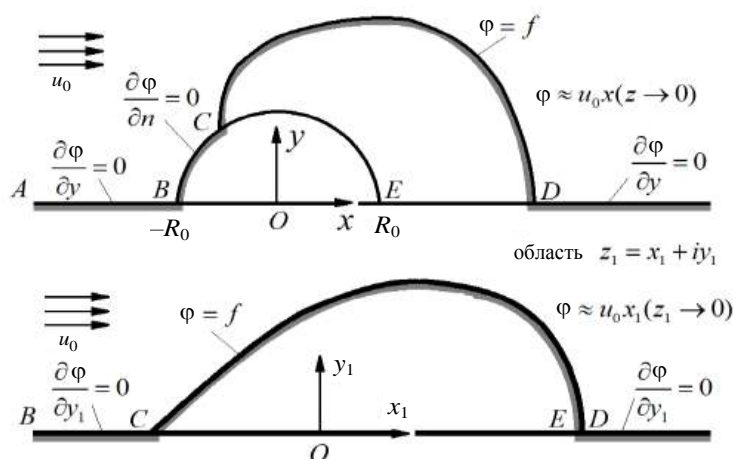


Рис. 3. Схема решения задачи в плоскости

Если в определенный момент времени значение потенциала на границе каверны известно ($\varphi = f$), то, решая гидродинамическую задачу, можно определить скорость точек границы и таким образом прогнозировать ее положение в следующий момент времени. Из условия постоянства давления на границе каверны можно найти граничное значение $\partial\varphi/\partial n$, следовательно, новое значение потенциала на передвинutom контуре. После чего расчет повторяется снова, что дает возможность пошагового определения эволюции поперечного сечения каверны. В качестве начального условия этого процесса за контур каверны примем круг радиуса R_0 с центром в начале координат, начальное значение потенциала равно нулю. Введем безразмерные величины $\bar{y} = y/R_K$; $\bar{\tau} = tW_0/R_K$; $\bar{\varphi} = \varphi/(W_0R_K)$; $\bar{u}_0 = u_0/W_0$, где за единицу длины принят радиус кавитатора R_K , за единицу скорости — скорость кавитатора W_0 . В безразмерном виде (черту над буквой опускаем) полная производная потенциала по времени на границе каверны будет равна

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\tau} = \frac{1}{2} \left[\sigma + u_0^2 + (\nabla\varphi)^2 \right]. \quad (3)$$

Решение краевой задачи для потенциала скорости будем находить методом конформных отображений, в результате чего физическую область переведем в вертикальную полосу, решение в которой может быть получено аналитическим методом. Сначала физическую плоскость z переводим в область z_1 (см. рис. 3) по формуле

$$z_1 = z + \frac{R_0^2}{z}. \quad (4)$$

или в координатном виде

$$x_1 = x \left(1 + \frac{R_0^2}{x^2 + y^2} \right); \quad y_1 = y \left(1 + \frac{R_0^2}{x^2 + y^2} \right)$$

При этом круг корпуса тела переходит на участок вещественной оси x_1 : $-2R_0 \leq x_1 \leq 2R_0$. Краевая задача в плоскости z_1 имеет вид (см. рис. 3). Точки контура CD (поверхность каверны) при этом пересчитываются по формуле (4) так же, как и точки поверхности корпуса.

Обратное преобразование имеет следующий вид:

$$z = \frac{1}{2} \left(z_1 + \sqrt{z_1^2 - 4R_0^2} \right). \quad (5)$$

В координатном представлении (5) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{2} \left(x_1 + \frac{x_1}{A} \sqrt{A - 4R_0^2} \right); \\ y &= \frac{1}{2} \left(y_1 + \frac{y_1}{A} \sqrt{A - 4x_1^2} \right); \\ A &= \frac{1}{2} \left(\sqrt{y_1^2 + (x_1 - 2R_0)^2} + \sqrt{y_1^2 + (x_1 + 2R_0)^2} \right). \end{aligned}$$

Далее область z_1 отобразим на верхнюю полуплоскость z_2 (см. рис. 3), считая, что контур CD задан координатами его точек и аппроксимируется ломаной линией. Это преобразование осуществляется известной формулой Кристоффеля-Шварца для отображения прямолинейных многоугольников. Контур CD при этом ложится на вещественную ось x_2 , причем точка C переходит в начало координат.

Если контур CD задан n точками, то в области z_2 они переходят соответственно в точки $y_2 = 0$; $x_2 = a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$.

Вычисление этих значений (прообразов вершин линии CD) производится методом П. П. Куфарова [11]. Одновременно этим же методом производим пересчет точек корпуса ракеты на участке BC .

Наконец, отобразим верхнюю полуплоскость z_2 в вертикальную полуполосу $\omega = \gamma + i\lambda$ (см. рис. 3) с помощью формул

$$\begin{aligned} z_2 &= \frac{a_n}{2} (1 - \cos \omega); \\ x_2 &= \frac{a_n}{2} (1 - \operatorname{ch} \lambda \cos \gamma); \end{aligned} \quad (6)$$

$$y_2 = \frac{a_n}{2} (1 - \operatorname{ch} \lambda \sin \gamma).$$

Границе каверны CD в области ω отвечает нижняя сторона полуполосы: $\lambda = 0$; $0 \leq \gamma \leq \pi$. Из (6) при $\lambda = 0$ получим зависимость

$$\gamma = 2 \arctg \sqrt{\frac{x_2}{a_n - x_2}},$$

поэтому прообразам вершин линии CD будут в ω отвечать точки

$$\lambda = 0; \quad \gamma_k = 2 \arctg \sqrt{\frac{a_k}{a_n - a_k}}. \quad (7)$$

Точки корпуса ракеты (участок BC) будут лежать на левой стороне полуполосы, т. е. на линии $\gamma = 0$. Они имеют координаты

$$\lambda = 0; \lambda = 2\ln\left(\sqrt{1 - \frac{x_2}{a_n}} + \sqrt{1 + \frac{x_2}{a_n}}\right).$$

Краевая задача для потенциала скорости во всех областях имеет одинаковый вид вследствие инвариантности уравнений Лапласа и граничных условий при конформных отображениях. В области ω изменится только условие на бесконечности в соответствии с формулой (6), так как при больших значениях λ она дает

$$x_2 \approx \frac{a_n}{4} e^\lambda \cos \gamma.$$

Если считать, что граничное значение потенциала скорости ($\varphi = f$) задано в точках контура CD в физической плоскости, то эти значения переносятся в точки γ_k (7) канонической области ω . В дальнейшем, однако, при разложении в ряд Фурье возникает необходимость вычисления граничного значения потенциала в точках, равномерно расположенных по оси γ на участке $0 \leq \gamma \leq \pi$. Для пересчета значений граничного потенциала в этих точках приходится применять интерполяцию.

Для потенциала скорости в области ω можно записать аналитическое выражение

$$\varphi(\gamma, \lambda) = q_0 \lambda - \frac{a_n}{2} u_0 \operatorname{sh} \lambda \cos \gamma + \sum_{k=0}^{\infty} f_k e^{-k\lambda} \cos k\gamma, \quad (8)$$

если известны коэффициенты Фурье функции $f(\gamma)$

$$f(\gamma) = \sum_{k=0}^{\infty} f_k \cos k\gamma.$$

Последние можно определить, например, методом быстрого преобразования Фурье. Из выражения (8) следует, что оно удовлетворяет уравнению Лапласа и необходимым краевым условиям, в том числе и условию на бесконечности. В это решение добавлен член $q_0 \lambda$, который не влияет на граничные условия и соответствует логарифмическому источнику интенсивности $q_0(\tau)$. Для определения его интенсивности рассмотрим производную площади поперечного сечения каверны по безразмерному времени:

$$\frac{dS}{dt} = 2 \int_{CD} \frac{\partial \varphi}{\partial n},$$

где интегрирование производится в физической плоскости (см. рис. 3).

В полуполосе эта формула имеет вид:

$$\frac{dS}{d\tau} = 2 \int_0^\pi \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} d\gamma.$$

Подставляя в нее выражение (8), получим:

$$\frac{dS}{d\tau} = 2\pi q_0.$$

Так как для осесимметричной каверны $S = 2R^2$ и $R(\tau)$ задается формулой (1), то для интенсивности q_0 получим выражение

$$q_0(\tau) = \frac{1}{2} \left(1 - 0,62\sigma(0)\tau - 0,3 \left(\frac{\tau}{Fr} \right)^2 \right).$$

Составляющие скорости $u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}$, $\vartheta = \frac{\partial \varphi}{\partial y}$ в физической плоскости выражаются через потенциал, заданный в области ω , формулами

$$u = \frac{\frac{\partial \varphi}{\partial \gamma} \frac{\partial x}{\partial \gamma} - \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} \frac{\partial y}{\partial \lambda}}{\left| \frac{dz}{d\omega} \right|^2}; \quad \vartheta = \frac{\frac{\partial \varphi}{\partial \gamma} \frac{\partial y}{\partial \gamma} - \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} \frac{\partial x}{\partial \lambda}}{\left| \frac{dz}{d\omega} \right|^2}. \quad (9)$$

Применение этих формул возможно всюду, кроме точек, лежащих на границе каверны, так как она аппроксимирована ломаной линией и в вершинах имеет слабые особенности. Но на границе каверны, так же, как и на корпусе ракеты, потенциал скорости и функция тока непрерывны. При этом имеют место соотношения

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \gamma} = \frac{\partial \varphi}{\partial l} \frac{\partial l}{\partial \gamma}; \quad \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} = -\frac{\partial \psi}{\partial \gamma} = -\frac{\partial \psi}{\partial l} \frac{\partial l}{\partial \gamma};$$

$$\frac{\partial x}{\partial \gamma} = \frac{\partial x}{\partial l} \frac{\partial l}{\partial \gamma}; \quad \frac{\partial y}{\partial \gamma} = \frac{\partial y}{\partial l} \frac{\partial l}{\partial \gamma}; \quad \left| \frac{dz}{d\omega} \right| = \frac{\partial l}{\partial \gamma},$$

где l — длина контура в физической плоскости. Подставляя эти значения в выражение (9), получим следующие формулы:

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial l} \frac{\partial l}{\partial l} + \frac{\partial \psi}{\partial l} \frac{\partial y}{\partial l}; \quad \vartheta = \frac{\partial \varphi}{\partial l} \frac{\partial y}{\partial l} + \frac{\partial \psi}{\partial l} \frac{\partial x}{\partial l}, \quad (10)$$

которые позволяют вычислять скорости во всех точках, в том числе и в точках границы каверны.

Функция тока $\psi(\gamma, \lambda)$ определяется как сопряженная с потенциалом (8) функция:

$$\psi(\gamma, \lambda) = -q_0 \gamma + \frac{a_n}{2} u_0 \operatorname{sh} \lambda \sin \gamma + \sum_{k=1}^{\infty} f_k e^{-k\lambda} \sin k\gamma.$$

Для вычисления скоростей удобно принять разностные аналоги формул (10).

Распределенная гидродинамическая нагрузка рассчитывалась по формуле

$$\frac{dC_n}{dz} = 2R_0 \int_0^\pi \bar{P} \cos \theta \, d\theta,$$

где θ — центральный угол сечения тела, а коэффициент давления $\bar{P} = (P - P_k) / \left(\frac{1}{2} \rho W_0^2 \right)$ находился по формуле

$$\bar{P} = \sigma - 2 \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} + u_0^2 - (\nabla \varphi)^2.$$

При переходе к новому шагу по времени координаты точек границы каверны пересчитываются в соответствии с вычисленными скоростями (10), а новые значения потенциала — исходя из уравнений (3). Оказалось более удобным это делать не в физической плоскости, а в области z_1 (см. рис. 3), т. к. тогда легко избежать особенности, имеющей место в точке схода границы каверны с тела. Связь между скоростями в этих областях получается, если продифференцировать формулу (4).

Расчет эволюции границы каверны в таком режиме показал, что ее точки сгущаются к левому краю (см. рис. 3), и аппроксимация контура ломаной линией постепенно становится неудовлетворительной. Чтобы избежать этого эффекта, проводят корректировку контура, целью которой является выравнивание расстояний между вершинами ломаной линии.

Расчет эволюции поперечных сечений производят до тех пор, пока каверна не схлопнется, при этом значение z соответствует длине каверны, которая дается уравнением (2). Устойчивость счета зависит от величины шага по времени, который должен быть достаточно малым, и от числа точек на контуре границы каверны. Обычно достаточно произвести 20 шагов до полного сжатия, т. е. производить расчет с шагом 0,05, а число расчетных точек на границе каверны задавать более 20 (в расчетах обычно брали от 21 до 31 точки).

Результаты расчетов сравнивали с известными экспериментальными исследованиями кавитационного обтекания тел вращения с углом атаки.

Расчетные значения распределенных нагрузок, а также суммарных сил и моментов по методу плоских сечений получаются больше экспериментальных примерно на 30 %, что, очевидно, связано с существующим эффектом поперечного растекания жидкости, поэтому на расчетные значения ввели

поправочный коэффициент, равный 2/3. С учетом этого коэффициента на рис. 4 приведены результаты сравнения распределенных гидродинамических нагрузок для различных условий обтекания, на рис. 5 — коэффициентов нормальной силы и на рис. 6 — профилей деформированных каверн.

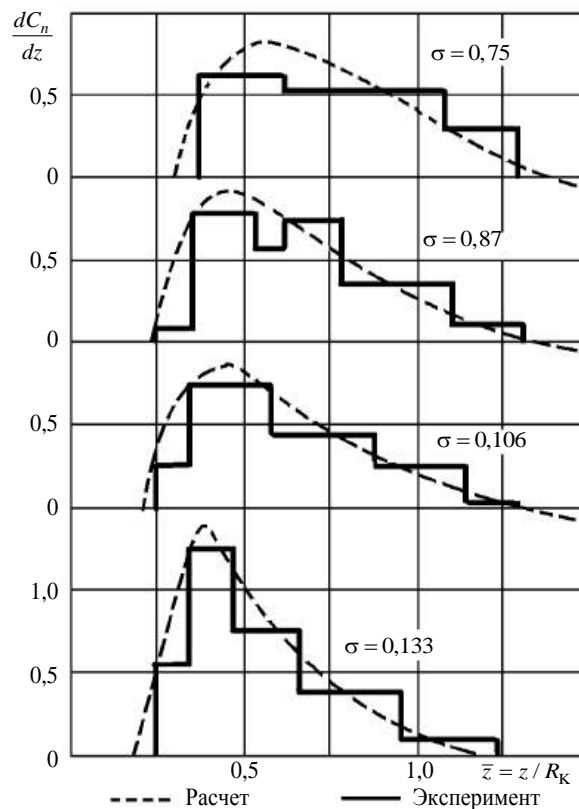


Рис. 4. Сравнение погонных нагрузок в невесомой жидкости при угле атаки 8°

Из рис. 4 следует, что в целом приближенные расчеты, выполненные по разработанному методу с учетом поправочного коэффициента, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Погонная нагрузка обычно имеет ярко выраженный максимум: если следовать принципу независимости расширения, она возникает вниз по потоку на некотором расстоянии от кавитатора, имеет крутой передний фронт, достигает своего максимального значения, а затем резко падает.

Проведенные методом плоских сечений расчеты для полубесконечного тела (цилиндра) показывают, что следующий за пиком спад нагрузки не связан с кормовым эффектом, как это может показаться из анализа экспериментов. Как правило, в корме каверны нагрузка становится отрицательной, однако она невелика и может реализоваться при достаточно большом удлинении тела (около 10 калибров).

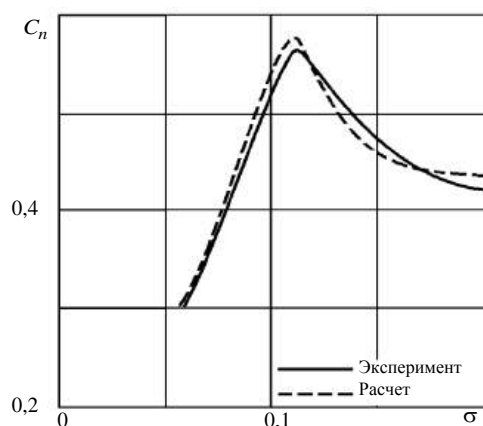


Рис. 5. Сравнение коэффициентов нормальной силы

На рис. 5 сравниваются расчетные и экспериментальные значения коэффициента нормальной силы, они также удовлетворительно согласуются.

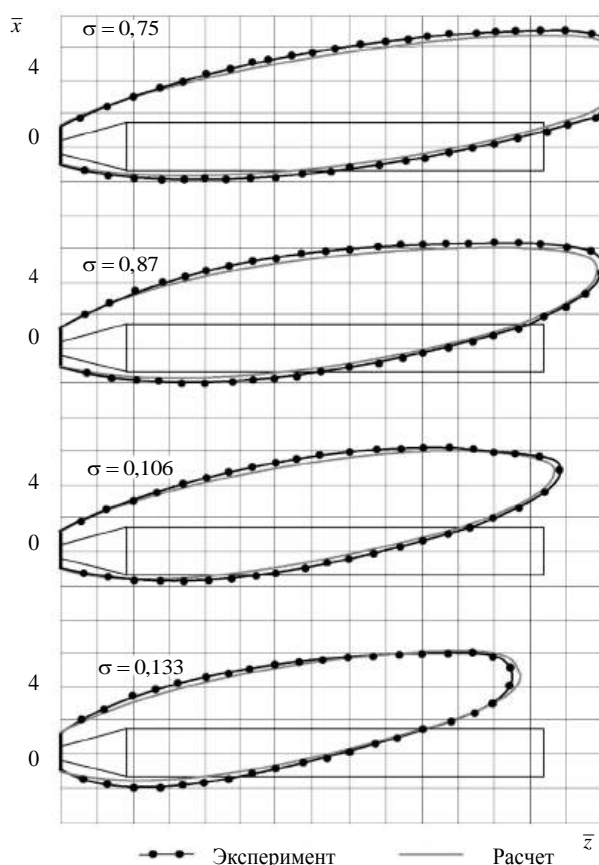


Рис. 6. Сравнение профилей каверн

Из рис. 6 следует, что деформированные расчетные профили весьма похожи на экспериментальные.

Учитывая сложность поставленной задачи и отсутствие аналогичных решений, можно считать полученное решение удовлетворительным и использовать его в практических расчетах.

Проведен анализ численных и экспериментальных исследований многофазного обтекания тонкостенных цилиндрических оболочек из КМ под водой при вертикальном движении. Разработана методика определения контура каверн и определения гидродинамических нагрузок и характеристик на изделие. Валидация и верификация проведены путем сравнения результатов расчетов с опытными данными. Полученные расчетные профили каверн удовлетворительно согласуются с экспериментальными. Создан программный комплекс, позволяющий проводить имитационное моделирование движения изделия под водой при многофазном обтекании. Получены экспериментальные и расчетные зависимости коэффициентов сопротивления от числа кавитации для вертикальных каверн. Показана возможность использования имитационного численного моделирования для определения гидродинамических характеристик изделий при многофазном обтекании.

Выводы

Разработана методика и представлено в аналитической интегральной форме общее решение задачи определения давления на тонкостенные цилиндрические оболочки из композиционных материалов при многофазном обтекании.

Полученные расчетные профили каверн удовлетворительно согласуются с экспериментальными. Создан программный комплекс, позволяющий проводить имитационное моделирование движения изделия под водой при многофазном обтекании.

Получены экспериментальные и расчетные зависимости коэффициентов сопротивления от числа кавитации для вертикальных каверн. Показана возможность использования имитационного численного моделирования для определения гидродинамических характеристик изделий при многофазном обтекании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дегтярь В. Г., Пегов В. И. Гидродинамика подводного старта ракет. — М.: Машиностроение, 2009. — 448 с.
2. Пегов В. И., Мошкин И. Ю. Исследование многофазного обтекания при свободном движении изделия к поверхности воды // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2022. № 6. С. 46—64.
3. Пегов В. И., Мошкин И. Ю., Чешко А. Д. Расчет нестационарного глиссирования кругового цилиндра по возмущенной поверхности жидкости // Челябинский физико-математический журнал. 2021. Т. 6. № 3. С. 338—346.
4. Пегов В. И., Мошкин И. Ю. Математическое моделирование процессов теплообмена горячих газовых струй с жидкостью при подводном старте аппарата // Челябинский физико-математический журнал. 2020. Т. 5. № 4. С. 451—462.

5. Пегов В. И., Мошкин И. Ю. Применение метода плоских сечений для определения характеристик летательных аппаратов при многофазном обтекании // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2020. № 4. С. 48—61.
6. Логвинович Г. В. Гидродинамика течений со свободными границами. — Киев: Наукова думка, 1969. — 208 с.
7. Логвинович Г. В., Буйвол В. Н., Дудко А. С. Течения со свободными поверхностями. — Киев: Наукова думка, 1985. — 295 с.
8. Буйвол В. Н. Тонкие каверны в течениях с возмущениями. — Киев: Наукова думка, 1980. — 295 с.
9. Буйвол В. Н., Журавлев Ю. Ф., Капанкин Е. Н. Возмущенное движение тонких пространственных каверн // Неустановившиеся течения воды с большими скоростями. — М.: Наука, 1973. С. 153—161.
10. Ламб Г. Гидродинамика. — М.: ОГИЗ, 1947. — 929 с.
11. Куфарев П. П. Об одном методе численного определения параметров в интеграле Кристоффеля—Шварца // Доклады АН СССР. 1947. Т. 57. С. 535—537.

Definition of pressure on thin-walled composite cylindrical shells under multiphase flow

^{1, 2} V. I. PEGOV, ¹ I. Yu. MOSHKIN

¹ South Ural Federal Scientific Centre of Minerology and Eco-Geology of the Ural Division of RAS,
Miass, Chelyabinsk Region, Russia

² Joint Stock Company "Academician V. P. Makeyev State Rocket Centre",
Miass, Chelyabinsk Region, Russia

The article reviews one of acute issues of the definition of pressure under cavitation flow. The article presents a methodology used to numerically simulate the shape of a cavity, define features of multiphase flow and estimate hydrodynamic loads and hydrodynamic parameters of composite items flown around with vertical water cavitation stream. The article provides the comparison of analyzed and experimental data. It also demonstrates the possibility of applying the methodology to define hydrodynamic parameters of items under multiphase flow.

Keywords: multiphase flow, hydrodynamics, gas-liquid layer, nonstationary flow, cavitation flow, hydrodynamic parameters, hydrodynamic loads.

УДК 533.601.1:629.7

DOI: 10.52190/2073-2562_2023_4_11

EDN: ABRIOQ

О моделировании аэродинамического коэффициента сопротивления тела вращения с малыми искажениями поверхности композитного теплозащитного покрытия при сверхзвуковом обтекании

¹ Ю. А. МОКИН, д-р физ.-мат. наук; ¹ С. Т. КАЛАШНИКОВ, канд. техн. наук; ^{1,2} Р. К. ШВАЛЕВА

¹ Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
г. Миасс, Челябинская обл., Россия

² АО «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева»,
г. Миасс, Челябинская обл., Россия

Рассмотрен вопрос моделирования аэродинамического коэффициента сопротивления c_x при малом пространственном угле атаки в зависимости от определяющих параметров. На основе анализа первой и второй вариаций аэродинамического коэффициента сопротивления при сверхзвуковом обтекании тела вращения с малыми пространственными вариациями поверхности композитного теплозащитного покрытия (ТЗП) предложена схема моделирования указанного коэффициента при малых углах атаки и скольжения. Описаны определяющие параметры предложенной модели, и в рамках метода ДГЛ (дифференциальная форма представления обобщенной гипотезы локальности) получены интегральные выражения для их вычисления. Схема моделирования основана на формуле Тейлора для функции двух аргументов, при вычислении параметров модели использовано разложение вариации поверхности в ряд Фурье.

Ключевые слова: сверхзвуковое обтекание, тело вращения, острый конус, композитный теплозащитный материал, слабая вариация поверхности, малый угол атаки, вариация аэродинамического коэффициента сопротивления.

К числу проблемных вопросов определения аэродинамических характеристик тел вращения с малыми случайными пространственными искажениями внешней поверхности композитных теплозащитных материалов при сверхзвуковом и гиперзвуковом обтекании под малым углом атаки, рассмотренных в работе [1], следует отнести и вопрос оценки возможных вариаций аэродинамического коэффициента сопротивления Δc_x при нулевом и малом пространственном угле атаки.

Величина Δc_x за счет искажений поверхности является аддитивной добавкой к номинальным значениям коэффициента сопротивления c_x при малых углах атаки (α) и скольжения (β).

Проблемный характер вопроса оценки величин Δc_x усугубляется в условиях неопределенности, отсутствия полной априорной информации о воз-

можном качественном виде искажений поверхности, обусловленных многочисленностью влияющих факторов, в том числе — случайного характера. Практическая значимость получения рациональных оценок величин возмущающих аэродинамических сил и моментов для задач динамики СЛА отражена в [2, 3]. В работах [2, 3] приведены интегральные выражения для расчета коэффициента c_x при обтекании неосесимметричных тел по теории Ньютона. В работе [4] приведена методика оценки дисперсии $D\{c_x\}$ случайного изменения коэффициента сопротивления при нулевом угле атаки для случайных вариаций поверхности ЛА с заданной автокорреляционной функцией в линейном приближении по малому параметру ϵ_r , характеризующему малость искажений поверхности, путем получения и анализа первой вариации δc_x на основе метода ДГЛ [5].

Моделирование движения неуправляемых летательных аппаратов (ЛА) близких по форме телам вращения, является одной из сложных задач аэродинамики и динамики. При расчете динамики таких ЛА, как правило, требуется знание величин коэффициента c_x не только при нулевом пространственном угле атаки, но и его зависимость от углов атаки α и скольжения β .

В данной работе приведено описание разработанной авторами схемы моделирования зависимо-

Мокин Юрий Александрович, старший научный сотрудник.
E-mail: ofpat@mail.ru

Калашников Сергей Тимофеевич, начальник отдела "Фундаментальные проблемы аэрокосмических технологий".
E-mail: ofpat@mail.ru

Швалева Роза Камилловна, младший научный сотрудник; инженер I категории.
E-mail: src@makeyev.ru

Статья поступила в редакцию 20 июля 2023 г.

© Мокин Ю. А., Калашников С. Т., Швалева Р. К., 2023

сти коэффициента $c_x(\alpha, \beta)$ от углов атаки и скольжения при сверхзвуковом обтекании затупленных тел вращения с малыми пространственными искажениями поверхности на основе формулы Тейлора второго порядка для функции двух переменных. Предметом анализа является составляющая коэффициента сопротивления, обусловленная силами давления, действующими по нормали к поверхности тела. Цель анализа — конструктивное наполнение содержанием указанной схемы путем вычисления коэффициентов формулы Тейлора ($\Delta c_{x0}, c_x^\alpha, c_x^\beta, c_x^{\alpha\alpha}, c_x^{\beta\beta}, c_x^{\alpha\beta}$) на основе метода ДГЛ [5]. Постановка и путь решения рассматриваемой задачи во многом аналогичны работе [6].

Представим уравнение поверхности тела вращения, затупленного или типа острого конуса с малыми искажениями поверхности в цилиндрической системе координат (x, r, φ) , ось OX направлена от носка к торцу, в виде:

$$r(x, \varphi) = y(x) + \varepsilon_r \delta r(x, \varphi), \quad 0 \leq x \leq L; \quad (1)$$

$$0 \leq \varphi \leq 2\pi,$$

где $y(x)$ — уравнение образующей исходного тела;
 $\delta r(x, \varphi)$ — слабая вариация поверхности;
 L — длина тела;
 ε_r — параметр малости искажения поверхности.

Обозначим R_m и $S_m = \pi R_m^2$ — радиус и площадь миделевого сечения исходного тела; $p(x) = y'(x) = \tan \theta_s$; θ_s — угол наклона образующей тела к оси OX . Для частных производных функции (1) используем стандартные обозначения: $p(x, \varphi) = \partial r(x, \varphi) / \partial x$; $q(x, \varphi) = \partial r(x, \varphi) / \partial \varphi$. Например, для острого конуса с углом полураствора θ_s : $y(x) = px$, где $p = \tan \theta_s$. Ось x направлена от носка к корме, является осью вращения исходного тела. Цилиндрическая система координат связана с декартовой соотношениями: $x = x$; $y = r \cos \varphi$; $z = r \sin \varphi$.

Представим вариацию поверхности композитного теплозащитного покрытия скоростного ЛА тригонометрическим рядом

$$\delta r(x, \varphi) = \varepsilon_r \left\{ a_0(x) + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n(x) \cos n\varphi + b_n(x) \sin n\varphi] \right\}, \quad (2)$$

в котором, для удобства, через $a_0(x)$ обозначен соответствующий "стандартный" коэффициент Фурье, уменьшенный в два раза. Выражения вари-

аций частных производных уравнения поверхности тела (1) имеют вид

$$\delta p(x, \varphi) = \varepsilon_r \left\{ a'_0(x) + \sum_{n=1}^{\infty} [a'_n(x) \cos n\varphi + b'_n(x) \sin n\varphi] \right\}, \quad (3)$$

$$\delta q(x, \varphi) = \varepsilon_r \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} [-a_n(x) \sin n\varphi + b_n(x) \cos n\varphi] n \right\}. \quad (4)$$

Ряд (2) также может быть представлен в форме [7, 8]

$$\delta r(x, \varphi) = \varepsilon_r \left\{ a_0(x) + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n(x) \sin(n\varphi + \psi_n(x))] \right\}, \quad (5)$$

где $A_n(x)$ и $\psi_n(x)$ амплитуда и фазовый угол n -й гармоники, соответственно. Соответствующий вид примут при этом и выражения (3), (4).

Будем рассматривать сверхзвуковое обтекание указанного тела потоком газа с заданным числом Маха M_∞ под нулевым или малым углом атаки. Составляющие вектора скорости набегающего потока (V_x, V_y, V_z) удовлетворяют соотношениям: $V_x > 0, |V_y / V_x| \ll 1, |V_z / V_x| \ll 1$, характеризующим малость углов атаки $\alpha = 0 + \varepsilon_\alpha \delta \alpha \approx V_y / V_x$ и скольжения $\beta = 0 + \varepsilon_\alpha \delta \beta \approx V_z / V_x$, где ε_α — параметр малости угла атаки. Аэродинамический угол крена γ и пространственный угол атаки α_n определены выражениями

$$\gamma = \arctg(V_z / V_y), \quad \alpha_n = \arctg(\sqrt{V_y^2 + V_z^2} / V_x).$$

Величины углов атаки, скольжения и пространственного угла атаки связаны соотношением $\cos \alpha_n = \cos \alpha \cos \beta$, при малых величинах α_n справедливо приближенное равенство $\alpha_n = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$ [2]. Аэродинамический угол крена γ соответствует угловой координате подветренной образующей поверхности обтекаемого тела в цилиндрической системе координат. При малых α_n величины углов атаки α , скольжения β , пространственного угла атаки α_n и угла крена φ связаны соотношениями $\alpha = \alpha_n \cos \gamma, \beta = \alpha_n \sin \gamma$.

Формально представим зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления c_x для фиксированной геометрии тела (1) при заданных

условиях обтекания от малых углов атаки и скольжения с помощью формулы Тейлора второго порядка для функции двух переменных $c_x(\alpha, \beta)$ в окрестности точки $(\alpha = 0, \beta = 0)$ в виде

$$c_x(\alpha, \beta) = c_x(0, 0) + c_x^\alpha \alpha + c_x^\beta \beta + \left(c_x^{\alpha\alpha} \alpha^2 + 2c_x^{\alpha\beta} \alpha \beta + c_x^{\beta\beta} \beta^2 \right) / 2, \quad (6)$$

и рассмотрим различные возможные способы, пути определения, вычисления коэффициентов формулы (6), имея в виду задачу оценки влияния малых искажений поверхности на изменение коэффициента c_x .

Перед рассмотрением возможных способов отметим следующие обстоятельства. Во-первых, первая польза от представления коэффициента c_x в виде суммы (6) заключается в возможности, при необходимости или при желании, проводить оценку некоторых слагаемых независимо друг от друга, различными методами. Во-вторых, общая задача оценки влияния малых искажений поверхности на c_x может иметь различные формулировки [1, 5], например:

- *частный детерминированный случай* — определить изменение c_x для конкретного заданного искажения поверхности $\delta r(x, \varphi)$;

- *экстремальная оценка* — оценить максимально возможное изменение c_x для заданного ограничения величины искажения поверхности $\delta r(x, \varphi)$;

- *вероятностная оценка* — оценить статистические параметры случайных величин Δc_x , рассматривая искажения поверхности $\delta r(x, \varphi)$ как случайные функции с заданными, некоторым подходящим образом, характеристиками.

При умеренных требованиях к точности определения коэффициента можно использовать различные приближенные методы. Интегральные выражения всех шести коэффициентов зависимости (6) для тел произвольной формы на основе теории Ньютона приведены в работе [3]. Однако точность указанной теории, как правило, ниже требуемой.

Одним из стандартных путей определения величины коэффициента c_x при нулевом угле атаки $c_x(0, 0)$ и его частных производных является проведение модельных или натурных экспериментальных исследований. Наряду с вопросами трудоемкости и стоимости таких исследований в качестве принципиальной технической трудности на этом пути отметим малость величин производных c_x^α, c_x^β , имеющих первый порядок малости по ε_r , затрудняющую их экспериментальную оценку.

Стандартным путем определения коэффициентов формулы (6) является использование результатов серии прямых численных расчетов по специально разработанным или существующим известным методам, программам, комплексам программ, например — типа ANSYS CFX, EFD.Lab, ЛОГОС. На этом пути наряду с чисто техническими трудностями расчета полностью пространственного обтекания без плоскостей симметрии и значительными трудозатратами проблемным вопросом, как показал опыт, является оценка методических и вычислительных погрешностей коэффициента c_x , зачастую сравнимых с номинальной величиной приращения Δc_x за счет искажений поверхности ЛА. Возможны также и трудности методического характера при получении экстремальных или вероятностных оценок Δc_x .

Авторами данной работы предложен альтернативный численно-аналитический путь определения коэффициентов формулы (6) на основе использования метода ДГЛ [5]. Указанный способ обладает определенными преимуществами, позволяет обойти ряд проблемных вопросов и может быть рассмотрен в качестве дополнительного к указанным инструментам при решении задачи моделирования коэффициента сопротивления. Совместное использование всех доступных возможностей позволяет, по нашему мнению, наиболее полно решить указанную задачу.

Для расчета коэффициента волнового сопротивления c_x , без учета сил трения и донного сопротивления, используем метод ДГЛ [5]. В случае обтекания острого конуса с углом полураствора θ предполагается реализация присоединенного скачка уплотнения, что гарантированно имеет место при $\theta \leq 50^\circ$. Особенности применения метода ДГЛ для острого конуса описаны в [9]. Здесь и далее фактически рассматривается только коэффициент волнового сопротивления в предположении, что именно разброс его величины является определяющим при оценке разброса суммарного коэффициента сопротивления.

Расчет коэффициента давления $\Phi = 2(p - p_\infty) / \rho_\infty V_\infty^2$ на поверхности тела (1) в рамках метода ДГЛ [5] в общем случае при малых углах атаки производится на основе зависимости типа формулы Тейлора

$$\Phi(x, \varphi) \approx \Phi(x) + \Phi_t(x) \Delta t + \frac{1}{2} \Phi_{tt}(x) \Delta t^2, \quad (7)$$

где $t = \tan(\alpha_m)$ — тангенс местного угла атаки; $\Delta t = t(x, \varphi) - p(x)$; $\Phi(x), \Phi_t(x), \Phi_{tt}(x)$ — коэффициенты-функции (7), вычисляемые для заданных условий обтекания для исходного контура тела с

использованием точных или приближенных методов и (или) программ.

В частном случае обтекания острого конуса зависимость коэффициента давления Φ от угла θ_k на его поверхности для заданных условий обтекания предполагаем заданной в виде дважды дифференцируемой функции $\Phi = \Phi(p)$. Расчет коэффициента давления на искаженной поверхности конуса (1) при малом угле атаки проведем в рамках метода касательных конусов с использованием заданной функции в форме $\Phi = \Phi(r)$. Последнее позволяет применить для расчета коэффициента Φ на поверхности конуса (1) зависимость в формате метода ДГЛ [5]

$$\Phi(x, \varphi) \approx \Phi(p) + \Phi_t(p)\Delta t + \frac{1}{2}\Phi_{tt}(p)\Delta t^2, \quad (8)$$

где $\Phi_t = \Phi_p$; $\Phi_{tt} = \Phi_{pp}$. При гиперзвуковых скоростях для расчета коэффициента давления $\Phi(p)$ на поверхности острого конуса может быть использована зависимость [10]

$$\Phi(\theta) = \left[2(k+1)(k+7)/(k+3)^2 \right] \sin^2 \theta, \quad (9)$$

где k — показатель адиабаты, называемая усовершенствованной формулой Ньютона для конуса. При сверхзвуковом обтекании известна приближенная аппроксимация [10]

$$\Phi(\theta, M_\infty) = (0,0016 + 0,002 M_\infty^{-2}) \theta^{1,7} \quad (10)$$

где θ_k — угол конуса в градусах. Для острого конуса с фиксированным углом θ для заданных условий обтекания величины Φ , Φ_t , Φ_{tt} постоянны, не зависят от координаты x .

При известном распределении коэффициента давления $\Phi(x, \varphi)$ на поверхности тела (1) коэффициент c_x выражается двойным (поверхностным) интегралом [5]

$$c_x = \frac{1}{S_M} \int_0^{L2\pi} \int_0^\pi \Phi(x, \varphi) r(x, \varphi) p(x, \varphi) d\varphi dx. \quad (11)$$

В рамках метода ДГЛ выражение (11) представимо в виде [5]

$$c_x = \frac{1}{S_M} \int_0^{L2\pi} \int_0^\pi F(x, \varphi, r, p, q, \alpha) d\varphi dx, \quad (12)$$

где $F(x, \varphi, r, p, q, \alpha) = \Phi(x, \varphi, r, p, q, \alpha) r p$.

При малых вариациях δr , δp , δq связанных соотношениями (2)—(5) и угла атаки $\delta \alpha = \varepsilon_\alpha \alpha$ в окрест-

ности точки $(y(x), y'(x), 0, 0)$ фазового пространства (r, p, q, α) первые две вариации подынтегральной функции интеграла (12) определяются выражением

$$\delta^k F = \left(\frac{\partial}{\partial r} \delta r + \frac{\partial}{\partial p} \delta p + \frac{\partial}{\partial q} \delta q + \frac{\partial}{\partial \alpha} \delta \alpha \right)^k {}^\circ F, \quad (13)$$

($k=1, 2$).

Соответствующие вариации интеграла (12) равны

$$\delta^k c_x = \frac{1}{S_M} \int_0^{L2\pi} \int_0^\pi \delta^k F dx d\varphi, \quad (k=1, 2). \quad (14)$$

При вычислении вариаций (13) обязательным этапом является вычисление производных функции $\Phi(x, \varphi, r, p, q, \alpha)$ по переменным r, p, q, α . Указанные производные первого и второго порядков связаны с производными $\Phi_t(x)$, $\Phi_{tt}(x)$ этой же функции, представленной в форме (7), соотношениями, описанными в [5, 11].

Использование указанных соотношений позволяет вычислить обе вариации (14) и приближенно представить коэффициент c_x в окрестности указанной выше точки в виде суммы

$$c_x \cong c_{x0} + \delta c_x + \delta^2 c_x / 2. \quad (15)$$

Аналитическое вычисление и анализ членов выражения (15) в рамках метода ДГЛ позволяет получить оценки коэффициентов в формуле Тейлора (6).

Выражение первой вариации получено в работе [4] и имеет вид

$$\delta c_x = \frac{2\varepsilon_r}{R_M^2} \times \left\{ \int_0^L \left\{ \Phi(x) p(x) a_0(x) + \right. \right. \\ \left. \left. + [\Phi_t(x) y(x) p(x) + \Phi(x) y(x)] a'_0(x) \right\} dx. \right\} \quad (16)$$

В линейном, по малому параметру ε_r , приближении величина приращения Δc_x (16) для фиксированной исходной геометрии ЛА и заданных условий обтекания зависит только от коэффициента $a_0(x)$ ряда (2). Для цилиндрических и цилиндрикоконических деталей величина $a_0(x)$ определяет отклонение размера — изменение среднего радиуса нормальных круговых сечений по длине детали [8]. Отметим, что величина первой вариации δc_x не зависит ни от гармоник ряда (2), ни от вариации угла атаки $\delta \alpha$.

Выражение второй вариации подинтегральной функции (13) имеет вид

$$\begin{aligned} \delta^2 F = & [\Phi_{rr}rp + 2\Phi_r p](\delta r)^2 + 2[\Phi_{rp}rp + \Phi_r r + \Phi_p p + \Phi](\delta r \delta p) + 2[\Phi_{rq}rp + \Phi_q p](\delta r \delta q) + \\ & + 2[\Phi_{ra}rp + \Phi_a p](\delta r \delta \alpha) + [\Phi_{pp}rp + 2\Phi_p r](\delta p)^2 + 2[\Phi_{pq}rp + \Phi_q r](\delta p \delta q) + \\ & + 2[\Phi_{pa}rp + \Phi_a r](\delta p \delta \alpha) + [\Phi_{qq}rp](\delta q)^2 + 2[\Phi_{qa}rp](\delta q \delta \alpha) + [\Phi_{aa}rp](\delta \alpha)^2. \end{aligned} \quad (17)$$

Подстановка в (17) выражений частных производных функции давления Φ по r, p, q, α с использованием её же производных $\Phi_t(x), \Phi_{tt}(x)$ из выражения (7) [5, 11] позволяет записать вторую вариацию (13) в виде

$$\begin{aligned} \delta^2 F = & 2[\Phi_t p + \Phi](\delta r \delta p) + 2[-\Phi_t(1+p^2)\cos\varphi p](\delta r \delta \alpha) + [\Phi_{tt}rp + 2\Phi_t r](\delta p)^2 + \\ & + 2[(-\Phi_{tt}(1+p^2)\cos\varphi - 2\Phi_t p \cos\varphi)rp + (-\Phi_t(1+p^2)\cos\varphi r)](\delta p \delta \alpha) + \\ & + [-\Phi_t p^2/r](\delta q)^2 + 2[-\Phi_t(1+p^2)p \sin\varphi](\delta q \delta \alpha) + \\ & + [\Phi_{tt}(1+p^2)^2 rp \cos^2\varphi + \Phi_t rp^2(1+p^2)(3\cos^2\varphi - 1)](\delta \alpha)^2. \end{aligned} \quad (18)$$

Выражение (18) содержит три члена с вариацией $\delta\alpha$ в первой степени, последний член с $\delta\alpha^2$, и три члена без неё. Соответственно представим интеграл (14) от второй вариации (18) после интегрирования по φ , с учетом соотношений ортогональности тригонометрических функций, суммой трех слагаемых

$$\delta^2 c_x = \delta^2 c_x^{(\varepsilon_r, \varepsilon_r)} + \delta^2 c_x^{(\varepsilon_r, \varepsilon_\alpha)} + \delta^2 c_x^{(\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\alpha)}, \quad (19)$$

где [7] с учетом представления вариации поверхности тела в форме (5)

$$\begin{aligned} \delta^2 c_x^{(\varepsilon_r, \varepsilon_r)} = & \frac{\pi}{S_m} \sum_{k=1}^{\infty} \int_0^L \times \\ & \times \left[(\Phi_{tt}rp + 2\Phi_t r)(A_k^2 \psi_k'^2 + A_k'^2) + \right. \\ & + 2(\Phi_t p + \Phi)A_k A_k' - \\ & \left. - \frac{\Phi_t p^2}{r} k^2 A_k^2 \right] dx. \end{aligned}$$

Величина $(\delta^2 c_x^{(\varepsilon_r, \varepsilon_r)} / 2)$ определяет добавку второго порядка малости ($\sim \varepsilon_r^2$) к величине приращения коэффициента сопротивления (16) (при нулевом угле атаки). Второе слагаемое в (19) определяем выражением

$$\begin{aligned} \delta^2 c_x^{(\varepsilon_r, \varepsilon_\alpha)} = & \frac{-2\pi\delta\alpha}{S_m} \int_0^L \times \\ & \times [\Phi_{tt}rp(1+p^2) + \Phi_t r(1+3p^2)] a_1'(x) dx, \end{aligned}$$

и определяет производную c_x^α в формуле (6)

$$c_x^\alpha = \frac{-1}{R_m^2} \int_0^L \left[\frac{\Phi_{tt}(x)y(x)y'(x)(1+y'^2(x)) +}{+ \Phi_t(x)y(x)(1+3y'^2(x))} \right] a_1'(x) dx, \quad (20)$$

аналогично получаем

$$c_x^\beta = \frac{1}{R_m^2} \int_0^L \left[\frac{\Phi_{tt}(x)y(x)y'(x)(1+y'^2(x)) +}{+ \Phi_t(x)y(x)(1+3y'^2(x))} \right] b_1'(x) dx. \quad (21)$$

Производные (20) и (21) имеют первый порядок малости по ε_r , зависят только от гармоник первого порядка $a_1(x), b_1(x)$ ряда (2), характеризующих смещения центров поперечных сечений цилиндрико-конических деталей. Для исходной симметричной формы тела производные (20) и (21) равны нулю. Последнее слагаемое в (19) определяется выражением

$$\delta^2 c_x^{(\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\alpha)} = \frac{\pi(\delta\alpha)^2}{S_m} \int_0^L [\Phi_{tt}rp(1+p^2)^2 + \Phi_t rp(1+p^2)] dx,$$

имеет второй порядок малости по ε_α и определяет производную $c_x^{\alpha\alpha}$ в формуле (6)

$$c_x^{\alpha\alpha} = \frac{1}{R_m^2} \int_0^L \left[\frac{\Phi_{tt}(x)y(x)y'(x)[1+y'^2(x)]^2 +}{+ \Phi_t(x)y(x)y'(x)[1+y'^2(x)]} \right] dx. \quad (22)$$

Вторая производная (22) имеет нулевой порядок малости, не зависит от искажения поверхности, и

совпадает с аналогичной производной для исходной геометрии тела. Поэтому из соображений симметрии зависимости c_x исходного тела от углов атаки и скольжения, и из условия ее четности по каждому из них, для коэффициентов формулы (6) справедливы равенства

$$c_x^{\beta\beta} = c_x^{\alpha\alpha}; c_x^{\alpha\beta} = 0. \quad (23)$$

Таким образом, исходная величина и приращение первого члена в формуле (6) определяется с использованием интегральных выражений (12), (16), (19) суммой

$$c_x(0,0) = c_{x0} + \delta c_x + \delta^2 c_x^{(\varepsilon_r \varepsilon_r)} / 2,$$

а производные $c_x^\alpha, c_x^\beta, c_x^{\alpha\alpha}, c_x^{\beta\beta}, c_x^{\alpha\beta}$ определяются выражениями (20)–(23). Формула (6) с учетом (23) может быть также представлена в виде

$$c_x(\alpha, \beta) = c_x(0,0) + c_x^\alpha \cdot \alpha + c_x^\beta \cdot \beta + c_x^{\alpha\alpha} \cdot \alpha^2, \quad (24)$$

$$\text{где } c_x^{\alpha\alpha} = c_x^{\alpha\alpha} / 2.$$

Для острых конусов $y(x) = px$ в рамках теории Ньютона в соответствии с (22) для производной $c_x^{\alpha\alpha}$ справедливы равенства

$$c_{x\text{new}}^{\alpha\alpha} = \frac{2(1-2p^2)}{1+p^2} = 2 - 3c_{x0}, \quad (25)$$

согласующиеся с известным фактом, что для более затупленных тел ($c_{x0} > 2/3$) производная $c_x^{\alpha\alpha}$ отрицательна, а для более заостренных ($c_{x0} < 2/3$) положительна. Для малых углов θ_s ($p \rightarrow +0$) производная возрастает ($c_x^{\alpha\alpha} \rightarrow 2-0$), для больших углов конуса θ_s ($p \rightarrow \infty$) убывает ($c_x^{\alpha\alpha} \rightarrow -4+0$). Например, для острого конуса при $p = 1$ ($\theta_s = 45^\circ$) $c_x^{\alpha\alpha} = -1$; для конуса с $p^2 = (1/2)$ ($\theta_s \approx 35,26^\circ$) производная $c_x^{\alpha\alpha} = 0$. Коэффициент сопротивления последнего конуса неизменен при углах атаки до $\alpha \leq \theta_s$; указанный конус замечателен ещё и тем, что коэффициент его центра давления $c_d = 1$ и также постоянен при указанных углах атаки. Последние две оценки для двух конусов подтверждены прямым численным расчетом. Обе они согласуются с зависимостью (22) и указывают на неверность формулы для расчета $c_x^{\alpha\alpha}$ тел вращения по теории Ньютона, приведенной в работе [2, с. 54].

Формулы (6, 24) описывают главную часть коэффициента c_x до членов второго порядка малости ЛА в форме тела вращения с малыми пространственными искажениями поверхности при малых углах атаки и скольжения в удобной для моделирования форме при решении пространственных задач динамики ЛА с дополнительным учетом составляющих от сил трения и донного давления.

Практическая полезность результатов обусловлена не только аналитической формой полученных соотношений, допускающей проведение дальнейшего качественного анализа, но и тем обстоятельством, что задача вычисления производных функции давления $\Phi_t(x), \Phi_n(x)$ для тела заданной геометрии на основе точного численного расчета обтекания нескольких близких тел вращения под нулевым углом атаки является и более простой, и менее трудоемкой, чем проведение серий расчетов пространственного обтекания тел с искажениями поверхности. Для ЛА, например в форме затупленного по сфере конуса, вычисление указанных производных может быть произведено заранее в широком диапазоне определяющих параметров [5].

Оценки ожидаемого уровня рассогласования величин коэффициентов формулы (6) для конических ЛА, вычисленных на основе прямых численных расчетов и с использованием интегральных выражений, полученных при использовании изложенной схемы, показали, что для типичных вариаций поверхности отличия производных c_x^α, c_x^β , полученных различными путями, не превышают $\approx 15-20\%$, а для второй производной $c_x^{\alpha\alpha}$ — имеют уровень $\approx 5-10\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Degtyar V. G., Kalaschnikov S. T., Mokin Yu. A. On problem of analyzing aerodynamic properties of blunted rotary bodies with small random surface distortions under supersonic and hypersonic flows. Proceedings of the XXV Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter (NEPCM 2017), AIP Conf. Proc. 1893, 020004-1–020004-6. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5007442>.
2. Ярошевский В. А. Движение неуправляемого тела в атмосфере. — М.: Машиностроение, 1978. — 168 с.
3. Липницкий Ю. М., Красильников А. В., Покровский А. Н., Шманенков В. Н. Нестационарная аэродинамика баллистического полета. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 176 с.
4. Мокин Ю. А., Калашников С. Т., Швалева Р. К. Оценка дисперсии коэффициента сопротивления тела вращения с малыми случайными искажениями поверхности композитного теплозащитного покрытия при сверхзвуковом обтекании // Конструкции из композиционных материалов. 2022. № 1. С. 5–10.
5. Мокин Ю. А. О возможностях решения задач гиперзвуковой аэродинамики на основе дифференциальной формы представления обобщенной гипотезы локальности и ее компо-

зиции с точными численными методами // Космонавтика и ракетостроение. 2008. Вып. 2(51). С. 136—145.

6. Мокин Ю. А. О моделировании коэффициента аэродинамического момента крена затупленных тел вращения с малой вариацией поверхности при сверхзвуковом их обтекании // Космонавтика и ракетостроение. 2012. Вып. 1(66). С. 38—44.

7. Мокин Ю. А. Анализ зависимости вариаций аэродинамических коэффициентов сопротивления и момента крена при сверхзвуковом обтекании тел вращения с малыми вариациями поверхности // Космонавтика и ракетостроение. 2009. Вып. 1(54). С. 168—174.

8. Бородачев Н. А., Абдрашитов Р. М., Веселова И. М. и др. Точность производства в машиностроении и приборостроении / под ред. Гаврилова А. Н. — М.: Машиностроение, 1973. — 567 с.

9. Калашников С. Т., Мокин Ю. А., Швалева Р. К. Об изменении положения центра давления острого конуса с малыми вариациями поверхности при гиперзвуковом обтекании // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/pulished.php?ID=85668>.

10. Краснов Н. Ф., Кошевой В. Н., Данилов А. Н., Захарченко В. Ф. Аэродинамика ракет / под ред. Краснова Н. Ф. — М.: Высш. шк., 1968. — 772 с.

11. Данилкин В. А., Костин Г. Ф., Мокин Ю. А., Тихонов Н. Н. Анализ структуры третьей вариации коэффициента момента крена при гиперзвуковом обтекании тел вращения с малыми пространственными вариациями поверхности на основе метода ДГЛ // Вестник Самарского государственного университета имени академика С. П. Королева. 2009. Вып. 4. С. 35—42.

On modelling of an aerodynamic drag coefficient of a rotary body with small surface distortions of a composite thermal protection coating at supersonic flow

¹ Yu. A. MOKIN, ¹ S. T. KALASHNIKOV, ^{1,2} R. K. SHVALEVA

¹ South Ural Federal Scientific Centre of Minerology and Eco-Geology of the Ural Division of RAS,
Miass, Chelyabinsk Region, Russia

² Joint Stock Company "Academician V. P. Makeyev State Rocket Centre",
Miass, Chelyabinsk Region, Russian

The issue of modeling is considered the aerodynamic drag coefficient c_x at small spatial angle of attack depending on the determining parameters. Based on the analysis of the first and second variations of the aerodynamic drag coefficient during supersonic flow around the body of rotation with small spatial variations of the surface of the composite heat-protective coating (TP), a scheme for modeling this coefficient at small angles of attack and slip is proposed. A scheme for modelling of the mentioned coefficient at small attack and yaw angles is proposed based on the analysis of the first and second variances of an aerodynamic drag coefficient of a rotary body with small surface distortions. Governing parameters of the proposed model are described and integral equations to compute them are obtained on the basis of the DLH (differential form for presenting a generalized locality hypothesis) method. The scheme for modelling is based on Taylor formula for a two-argument function, the expansion of surface distortions into a Fourier series is used to estimate the model parameters.

Keywords: supersonic flow, rotary body, sharp cone, composite thermal protection material, small surface distortion, small attack angle, variance of an aerodynamic drag coefficient.

УДК 532.5.031

DOI: 10.52190/2073-2562_2023_4_18

END: AJWNWF

Об инженерном методе расчета аэродинамических характеристик вертолетного винта из композиционного материала

^{1,2} И. И. ВАЛОВ, канд. физ.-мат. наук; ² С. Т. КАЛАШНИКОВ, канд. техн. наук

¹ Миасский филиал ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет»,
г. Миасс, Челябинская обл., Россия

² Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
г. Миасс, Челябинская обл., Россия

Описано построение математической модели, предназначенной для исследования обтекания аэродинамической поверхности плоским потоком, а также предложено использовать такой подход на случай движителя винтовой формы.

Ключевые слова: обтекание крыла, плоское течение, метод фиктивных источников, подъемная сила.

При исследовании на экспериментальных установках аэрогидродинамических характеристик различных летательных и подводных аппаратов, а также их движителей, перед исследователем встает задача о выборе средств измерения, регистрирующих снимаемые показания (давление, скорости в различных точках потока, действующие на державки силы) в определенном диапазоне изменения величин. При этом, для того чтобы заранее подобрать средства измерения и материальную часть, способную выдержать возникающие нагрузки, экспериментатору следует заранее оценить интересующие его характеристики течения [1].

Для этого желательно владеть инженерной методикой, позволяющей приблизительно рассчитать эти величины.

В данной работе предложена инженерная математическая модель расчета подъемной силы несущего вертолетного винта на примере марсианского вертолета Ingenuity, выполненного по соосной двухвинтовой схеме. На рис. 1 представлен его внешний вид (фотография с сайта НАСА). Для облегчения конструкции аппарата большая часть ее элементов выполнена из композиционных материалов, включая и несущий винт вертолета (пенокартон, покрытый слоем углеволокна).

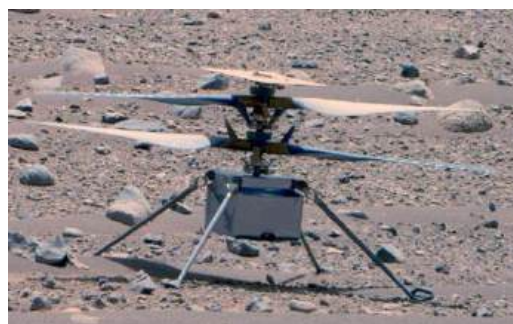


Рис. 1. Внешний вид вертолета Ingenuity

Алгоритмически решение задачи представляется достаточно простым. Разобьем лопасть на достаточно большое количество частей равной ширины l и заменим каждую из них прямоугольным участком профиля (рис. 2).

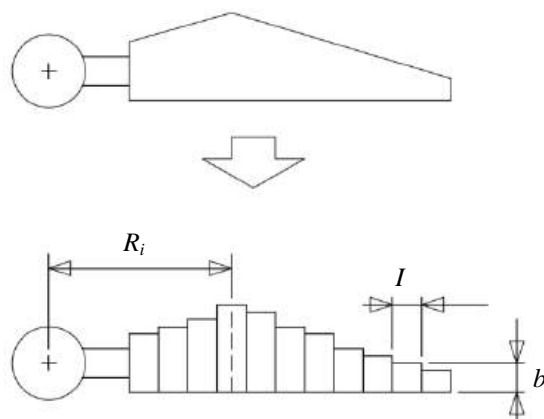


Рис. 2. Схема разбиения вертолетной лопасти

Будем считать, что каждый участок профиля обтекает поток с постоянной по всей его ширине скоростью u_i , где скорость потока может быть рассчитана по несложной формуле $u_i = 2\pi R_i \eta$. Здесь η — число оборотов винта в секунду, R_i — расстояние от оси винта до средней линии соответствующего

Валов Илья Игоревич, доцент, научный сотрудник отдела "Фундаментальные проблемы аэрокосмических технологий".
E-mail: vii_1982@mail.ru

Калашников Сергей Тимофеевич, начальник отдела "Фундаментальные проблемы аэрокосмических технологий".
E-mail: ofpat@mail.ru

Статья поступила в редакцию 31 июля 2023 г.

© Валов И. И., Калашников С. Т., 2023

прямоугольника. Далее подъемная сила может быть найдена как сумма сил, действующих на каждый прямоугольный участок:

$$F_y = k \times \sum_{i=1}^M C_y \frac{\rho u_i^2}{2} b_i l, \quad (1)$$

где M — общее количество частей, на которые разбита лопасть;
 b_i — длина хорды i -го участка;
 C_y — коэффициент подъемной силы;
 ρ — плотность набегающего потока;

$k = 0,85-0,95$ — коэффициент, учитывающий вихревые явления [2].

Как видно, остается открытым вопрос об определении коэффициента C_y . Проиллюстрируем процесс его нахождения для конкретного профиля — ЦАГИ А-18 % [3]. В соответствии со схемой на рис. 3 разместим внутри объема профиля совокупность плоских фиктивных источников, каждый обильностью Q_i , $i=1...N$ (в данном примере $N=16$, что априори дает достаточно грубое приближение исследуемого процесса).

В этом случае общий потенциал потока при обтекании профиля потоком под углом α запишем в следующем виде [4]:

$$\Phi = x u \cos \alpha + y u \sin \alpha + \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{2\pi} \ln \left(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \right),$$

где u — скорость набегающего потока;
 x_i, y_i — координаты i -го фиктивного источника.

Тогда в любой точке потока компоненты вектора скорости будут определены как

$$u_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = u \cdot \cos \alpha + \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^N \frac{Q_i (x-x_i)}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2},$$

$$u_y = \frac{\partial \Phi}{\partial y} = u \cdot \sin \alpha + \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^N \frac{Q_i (y-y_i)}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}.$$

Обильности источников Q_i рассчитаем, потребовав выполнения условия непротекания $\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$

на поверхности крыла (\vec{n} — вектор нормали к поверхности).

Распишем это уравнение в разностной форме как $\frac{\partial \Phi}{\partial n} \approx \frac{\Phi_A - \Phi_B}{|AB|}$, где A и B — точки, близкие к

точке поверхности, в которой берется производная по направлению, расположенные на малом расстоянии от нее по обе стороны так, что вектор AB оказывается перпендикулярен поверхности. Тогда требование равенства нулю производной по направлению заменяется требованием $\Phi_A = \Phi_B$. Теперь, записав его для N точек, равномерно распределенных по обтекаемой поверхности, мы получим систему из N линейных уравнений с N неизвестными Q_i . Решая ее, найдем требуемые величины. На рис. 4 показана схема размещения точек на профиле крыла, для которых составляется система линейных уравнений.

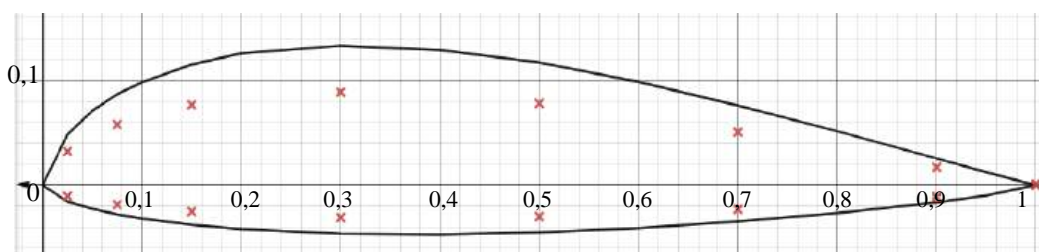


Рис. 3. Схема размещения фиктивных источников

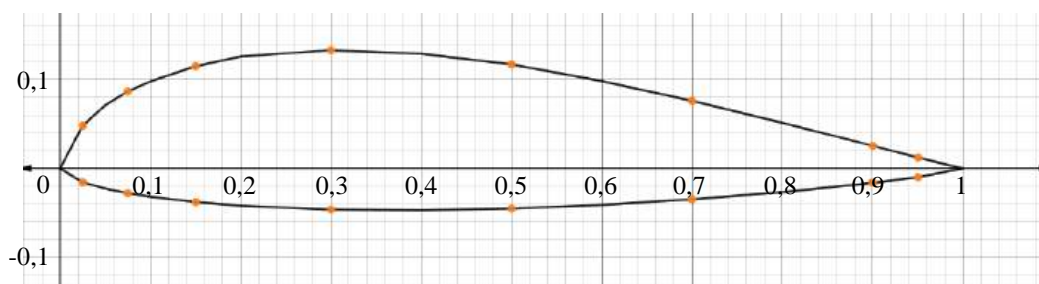


Рис. 4. Схема размещения точек, в которых требуем выполнения условия непротекания

Исходя из уравнения Бернулли $P + \frac{\rho u^2}{2} = \text{const}$, становится возможным найти давление P в любой интересующей нас точке обтекаемой поверхности, а проинтегрировав давление по поверхности профиля, найти действующую на крыло подъемную силу F_y (ρ — плотность набегающего потока, P — давление). Коэффициент подъемной силы C_y может быть найден по формуле

$$C_y = \frac{2F_y}{\rho u^2 b L},$$

где b — длина хорды профиля;
 L — размах крыла.

На рис. 5 показан график зависимости коэффициента подъемной силы C_y для исследуемого профиля от угла атаки.

Геометрические характеристики несущего винта вертолета Ingenuity были сняты с его трехмерной модели, размещенной для открытого доступа на сайте НАСА [5]. К сожалению, данная модель не дает точного представления о профиле винта. В качестве близкого к нему был выбран тонкий симметричный профиль NASA-0012 (характеристики приведены на рис. 6).

По данным агентства ТАСС, вес аппарата на Марсе составляет 6,67 Н, частота вращения лопастей — 40 об/с. Плотность атмосферы Марса равна 0,02 кг/м³. Коэффициент ометания σ (отношение площади лопастей к площади круга, образованного концами лопастей при их вращении) составил 0,04. При таком его значении подъемная сила несущего винта прямо пропорционально зависит от количества лопастей.

Расчеты по формуле (1) показывают, что при угле атаки в диапазоне от 16 до 22 градусов на одну лопасть приходится подъемная сила не менее 1,67 Н, что суммарно дает усилие, достаточное для подъема аппарата в атмосферу Марса.

Предложенная в работе инженерная математическая модель исследования обтекания аэродинамической поверхности может быть реализована на обычном персональном компьютере, без использования кластерных технологий. Результаты проведенных по ней расчетов показывают удовлетворительное согласование с экспериментом в части нахождения аэродинамических коэффициентов плоского крыла и подъемной силы несущего винта вертолета. Тем не менее, будет полезна и дополнительная верификация предложенной методики.



Рис. 5. График зависимости C_y от угла атаки:

1 — коэффициент, рассчитанный по приведенной методике;
 2 — коэффициент, определенный экспериментально

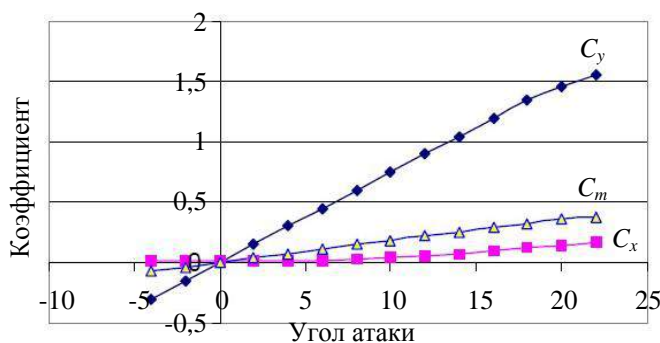


Рис. 6. Аэродинамические коэффициенты профиля NASA-0012

ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас аэродинамических характеристик профилей крыльев, испытанных в трубе Т-1 ЦАГИ / под ред. Ушакова Б. А. // Труды Центрального аэрогидродинамического института им. проф. Н. Е. Жуковского. — М.: Издание ЦАГИ. 1935. Вып. 193. — 78 с.
2. Загордан А. М. Элементарная теория вертолета. — М.: Военное издательство Министерства обороны СССР. 1955. — 214 с.
3. Справочник авиационных профилей [Электронный ресурс]. URL: http://www.kipla.kai.ru/liter/Spravochnic_avia_profiley.pdf (дата обращения: 30.03.2023).
4. Чижиумов С. Д. Основы гидродинамики: учеб. пособие. — Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО "КнАГТУ", 2007. — 106 с.
5. Ingenuity. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.jpl.nasa.gov/missions/ingenuity> (дата обращения: 14.05.2023).

On engineering method of analysis of aerodynamic characteristics of a composite helicopter propeller

^{1, 2} I. I. VALOV, ² S. T. KALASHNIKOV

¹ Miass Branch of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Chelyabinsk State University", Miass, Chelyabinsk Region, Russia

² South Ural Federal Scientific Centre of Minerology and Eco-Geology of the Ural Division of RAS, Miass, Chelyabinsk Region, Russia

The article is devoted to the creation of a math model to be used for study of two-dimensional flow around an aerodynamic surface and extension of the method to a propeller-shaped propulsor.

Keywords: flow around a wing, two-dimensional flow, a method of fictitious sources, lift force.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ

УДК 678.021

DOI: 10.52190/2073-2562_2023_4_22

END: ARUVSH

Алгоритм расчета эффективных упругих характеристик анизотропных структур армированных пластиков с использованием программных комплексов САЕ

Д. А. ТРОФИМОВ; И. Д. СИМОНОВ-ЕМЕЛЬЯНОВ, д-р техн. наук
ФГБОУВО «МИРЭА — Российский технологический университет»

(Институт тонких химических технологий имени М. В. Ломоносова), Москва, Россия

С. И. ШАЛГУНОВ, канд. хим. наук; В. И. СОКОЛОВ, д-р техн. наук
АО «НПО Стеклопластик», пос. Андреевка, Московская обл., Солнечногорский р-н, Россия

Впервые предложен алгоритм расчета упругих характеристик ортотропной модели анизотропных структур с использованием программных комплексов САЕ. Алгоритм основывается на определении эффективных упругих характеристик элементарной 3D-ячейки армирующего полимерного композиционного материала произвольной структуры с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Алгоритм характеризуется высокой точностью определения всех девяти характеристик ортотропной модели исследуемой структуры.

Ключевые слова: упругие характеристики, ортотропная модель, САЕ, МКЭ, армированные полимерные композиционные материалы.

Точный и надежный способ расчета (определения) эффективных упругих характеристик произвольной структуры анизотропного материала всегда является целью конструкторов и исследователей армированных полимерных композиционных материалов (АрПКМ).

В общем случае эта задача требует решения задачи теории упругости по определению напряженно-деформированного состояния в многосвязной области полимерная матрица—армирующий материал. Наиболее полно известные на сегодняшний день подходы для решения данной задачи представлены в работах [1, 2].

Ввиду сложности общей задачи известные подходы основываются на определенных допущениях, позволяющих получить решение в аналитическом виде. Наиболее широко используют приближение Фойгта, дающее верхнюю оценку, и приближение Рейсса, дающее нижнюю оценку значений модулей упругости анизотропной структуры в разных направлениях. Разница между этими оценками получила название вилки Хилла, а истинные значения модулей упругости лежат где-то внутри данного диапазона.

Однако даже при таких приближениях известные решения ограничиваются решением задачи лишь для простейших однонаправленных структур.

Предлагаемый в данной статье алгоритм позволяет находить достаточно точные значения упругих характеристик для любой произвольной структуры АрПКМ.

На практике задача несколько усложняется, поскольку принципиально важным при исследовании таких материалов является необходимость определения не только характеристик АрПКМ как функции структуры и формы переплетения элементов, составляющих армирующий материал, а также и расположения армирующих элементов структуры непосредственно в реальном АрПКМ и изделии, например, с учетом степени упрессовки (сжатия)

Трофимов Дмитрий Александрович, аспирант.

E-mail: d.trofimov@npostek.ru

Симонов-Емельянов Игорь Дмитриевич, заведующий кафедрой "Химия и технология переработки пластмасс и полимерных композитов", профессор.

E-mail: simonov@mitht.ru

Шалгунов Сергей Иосифович, директор ВНИИ стеклопластиков и стекловолокна.

E-mail: s.shalgunov@npostek.ru

Соколов Владимир Иванович, начальник отдела композитов радиотехнического назначения.

E-mail: V.Sololov45@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14 июля 2023 г.

© Трофимов Д. А., Симонов-Емельянов И. Д., Шалгунов С. И., Соколов В. И., 2023

армирующего материала, которая может изменяться в технологическом процессе.

Комплексный подход, предложенный в работе [3], позволяет получать 3D-модели любых реальных структур АрПКМ, эффективные характеристики, которых можно определять методами МКЭ (FEM), как самыми распространенными инструментами, обладающими достаточными вычислительными ресурсами для решения таких задач.

В соответствии с разработанными методическими подходами [4], определяют следующие упругие характеристики ортотропных анизотропных материалов в ортогональной системе координат (x, y, z):

- модули упругости сжимающих (растягивающих) напряжений E_x, E_y, E_z ;
- коэффициенты Пуассона сжимающих (растягивающих) напряжений $\mu_{xy}, \mu_{yz}, \mu_{xz}$;
- модули сдвига G_{xy}, G_{yz}, G_{xz} .

В данной статье авторы предлагают алгоритм для расчета этих упругих характеристик с помощью МКЭ по 3D-модели элементарной структурной ячейки АрПКМ без каких-либо дополнительных допущений и приближений с полным соблюдением всех условий деформации этой модели в соответствии с законом Гука.

Определение параметров нормальных (сжимающих–растягивающих) упругих характеристик

Для решения поставленной задачи зададим, что исследуемая элементарная ячейка анизотропного ортотропного материала представляет собой параллелепипед с шестью гранями и подвергается одноосному сжатию (растяжению) в соответствии с условиями классического эксперимента Гука, как представлено в работе [1].

Ключом к решению поставленной задачи является анализ и правильное задание граничных условий.

В контексте поставленной задачи все граничные условия можно условно разделить на 3 основные группы.

1. Фиксация элементарной ячейки в пространстве.
2. Обеспечение геометрических условий деформации элементарной ячейки в соответствии с законом Гука.
3. Задание внешних воздействий или деформаций элементарной ячейки.

Следует отметить, что традиционные решения задач определения напряженно-деформированного состояния инструментами САЕ ограничиваются лишь первой и третьей группами ограничений.

Необходимость введения второй группы граничных условий для решения данной задачи продемонстрирована на рис. 1, на котором представлена "утрированная" деформация элементарной ячейки слоистой структуры, состоящей из слоев разных материалов, без соблюдения второй группы перечисленных граничных условий.

Из рис. 1 видно, что анизотропность структуры элементарной ячейки в классическом исследовании вызывает деформации элементарной ячейки, несоответствующие поведению такой ячейки внутри тела АрПКМ, подверженного внешним нагрузкам.

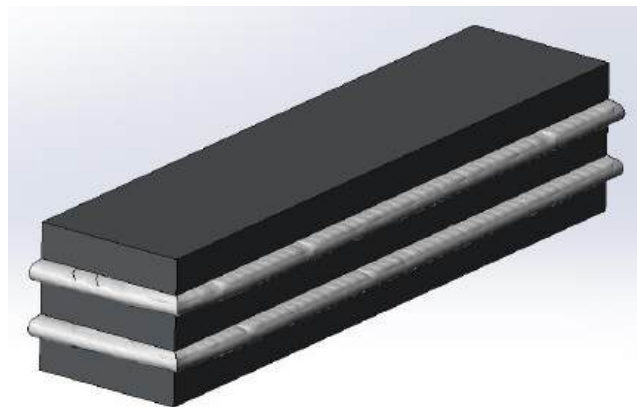


Рис. 1. Деформации слоистой структурной ячейки без граничных условий второй группы

Три другие грани (U, L и R), сходящиеся в вершине, находящейся на противоположном конце главной диагонали рассматриваемой элементарной ячейки, представлены на рис. 2.

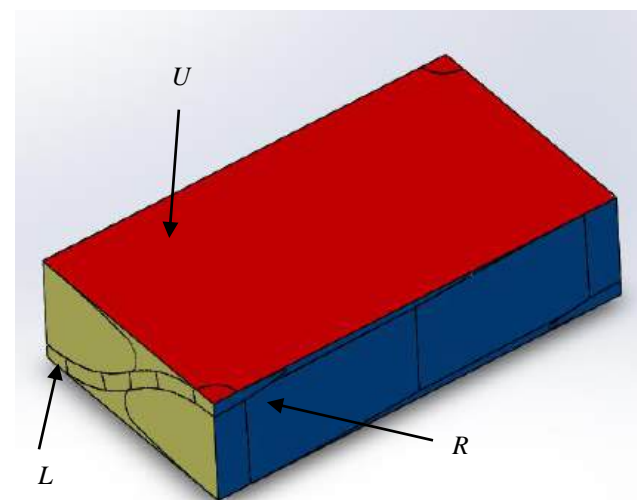


Рис. 2. Грани, задающие деформацию исследуемой элементарной структурной ячейки АрПКМ

В связи с этим рассмотрим все эти группы граничных условий более подробно.

К первой группе указанных граничных условий можно отнести довольно очевидные и наиболее часто встречающиеся в исследованиях САЕ ограничения к трем граням, сходящимся в одной вершине элементарной ячейки, для перемещений в направлениях, перпендикулярных к этим граням (невидимы на рис. 2).

Применение этой группы граничных условий фиксирует элементарную ячейку в пространстве и ее вращательные степени свободы, что полностью соответствует ее поведению, как элементарной ячейки тела АрПКМ при внешнем нагружении.

Вторая группа граничных условий необходима для того, чтобы обеспечить деформации элементарной ячейки в соответствии с классическим законом Гука.

Для выполнения этого условия необходимо на этих трех гранях (U , R , L) задавать плоскопараллельные перемещения, так как в современных программах САЕ только таким способом можно задать нагрузку без деформации поверхности грани.

Поскольку такие деформации также направлены перпендикулярно указанным граням, то они выбирают все оставшиеся степени свободы элементарной ячейки, и задача становится предопределенной.

Решатель САЕ, безусловно, решит и такую задачу, однако она не будет соответствовать поставленной задаче и содержать необходимое решение.

По этой причине третья группа граничных условий, касающаяся соблюдения необходимого баланса напряжений внутри элементарной ячейки, становится дополнительным условием, требующим формулировки критерия соответствия расчетной модели физической модели и подбора условий для выполнения этого критерия.

Аналитические возможности любого программного модуля САЕ позволяют при любых заданных деформациях определять силы, приложенные к любым граням исследуемого тела.

Таким образом, задача расчета упругих характеристик элементарной ячейки при одноосном нагружении сводится к заданию таких деформаций этих трех граней, когда на двух из них L и R значения сил равны нулю.

Тогда относительные перемещения на этих гранях определяют коэффициенты Пуассона μ_{xy} , μ_{xz} в соответствующих направлениях, а значение силы на грани U и ее относительное смещение определит модуль упругости E_x в направлении оси, перпендикулярной этой грани.

В дальнейших рассуждениях примем, что сила прикладывают к верхней грани U , а нулевые усилия должны быть обеспечены на левой L и R гранях (см. рис. 2).

Подбор перемещений левой и правой граней, обеспечивающих нулевые усилия на них, с математической точки зрения является задачей поиска нулевого значения функции двух переменных, и без математического анализа может занять очень много времени, или вообще стать неразрешимой.

Некоторые приложения САЕ имеют надстройки для решения подобных задач численными методами, так как уравнение Гука линейно, данная задача может быть решена инструментами линейной алгебры.

Для достижения поставленной цели рассмотрим систему координат пространства заданных параметров и определим алгоритм поиска решения данной задачи.

Исходя из изложенного получаем систему координат пространства решений поставленной задачи (рис. 3):

l — перемещение левой грани элемента;

r — перемещение правой грани элемента;

f — усилие на грани элемента, соответственно, f_l на левой, а f_r на правой грани.

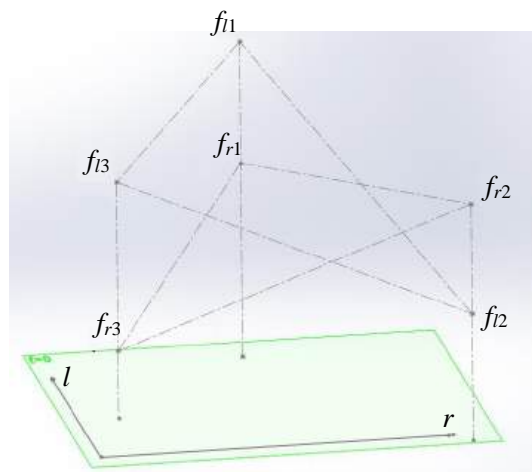


Рис. 3. Пространство решений значений напряжений на боковых гранях исследуемой элементарной ячейки АрПКМ в зависимости от значений их перемещений

Каждый проведенный расчет (напряженно-деформированное состояние элементарной ячейки) дает две точки в рассмотренной системе координат (r_i, l_i, f_{li}) и (r_i, l_i, f_{ri}) .

Учитывая, что уравнение Гука, связывающее напряжения (усилия) и перемещения, линейно, то точки, отображающие результаты расчетов, образуют плоскость.

Таким образом, имеется две плоскости:

$$f_l = f(r, l), \quad (1)$$

для значений усилий на левой грани элемента, и

$$f_r = f(r, l), \quad (2)$$

для значений усилий на правой грани элемента.

Так как плоскость полностью определена тремя точками, то для решения необходимо всего 3 варианта расчета или три соответствующих им напряженно-деформированных состояния элементарной ячейки с разными значениями (r, l) .

Уравнение плоскости, проходящей через 3 точки, запишем как [5]:

$$Al + Br + Cf + D = 0, \quad (3)$$

где

$$A = \begin{vmatrix} r_1 & f_1 & 1 \\ r_2 & f_2 & 1 \\ r_3 & f_3 & 1 \end{vmatrix} = r_2 f_3 - r_3 f_2 - r_1 f_3 + r_3 f_1 + r_1 f_2 - r_2 f_1 \quad (4)$$

$$B = \begin{vmatrix} f_1 & l_1 & 1 \\ f_2 & l_2 & 1 \\ f_3 & l_3 & 1 \end{vmatrix} = f_2 l_3 - f_3 l_2 - f_1 l_3 + f_3 l_1 + f_1 l_2 - f_2 l_1 \quad (5)$$

$$C = \begin{vmatrix} l_1 & r_1 & 1 \\ l_2 & r_2 & 1 \\ l_3 & r_3 & 1 \end{vmatrix} = l_2 r_3 - l_3 r_2 - l_1 r_3 + l_3 r_1 + l_1 r_2 - l_2 r_1 \quad (6)$$

$$D = - \begin{vmatrix} l_1 & r_1 & f_1 \\ l_2 & r_2 & f_2 \\ l_3 & r_3 & f_3 \end{vmatrix} = - (l_1 r_2 f_3 - l_1 r_3 f_2 - l_2 r_1 f_3 + l_2 r_3 f_1 + l_3 r_1 f_2 - l_3 r_2 f_1) \quad (7)$$

Искомое решение должно удовлетворять условию:

$$f_l = f_r = 0, \quad (8)$$

т. е. лежать на линии пересечения плоскостей (1), (2) и в плоскости $f = 0$.

Для нахождения координаты точки пересечения этих плоскостей нужно решить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} A_l l + B_l r + C_l f + D_l = 0 \\ A_r l + B_r r + C_r f + D_r = 0 \\ f = 0 \end{cases} \quad (9)$$

или

$$\begin{cases} A_l l + B_l r + D_l = 0 \\ A_r l + B_r r + D_r = 0 \end{cases} \quad (10)$$

В результате, имеется два линейных уравнения с двумя неизвестными.

После несложных типовых преобразований получим соотношения для искомых величин r и l :

$$r = \frac{\frac{D_r A_l}{A_r} - D_l}{B_l - \frac{B_r A_l}{A_r}}; \quad l = \frac{-B_l r - D_l}{A_l} \quad (11)$$

Таким образом, для получения результата по предлагаемому алгоритму требуется провести три расчета и четвертый поверочный для r и l , определенных по уравнению (11), для того, чтобы убедиться в отсутствии усилий на боковых гранях L и R элементарной ячейки. Затем следует рассчитать значения искомых модуля упругости вдоль заданной оси нагружения и соответствующих коэффициентов Пуассона.

Опираясь на классический закон Гука, схема которого приведена на рис. 4, искомые значения эффективных характеристик для исследуемой анизотропной структуры могут быть вычислены по следующим соотношениям:

$$E_x = \frac{Fx}{y z \Delta x}, \quad (12)$$

$$\mu_{xy} = \frac{x \Delta y}{y \Delta x}, \quad (13)$$

$$\mu_{xz} = \frac{x \Delta z}{z \Delta x}, \quad (14)$$

где x — длина образца вдоль оси приложения нагрузки;
 y, z — длины образца поперек оси приложения нагрузки;
 Δx — деформация образца вдоль оси приложения нагрузки;
 $\Delta y, \Delta z$ — изменения длины образца поперек оси приложения нагрузки;
 F — сила сжатия;
 μ — коэффициент Пуассона материала образца.

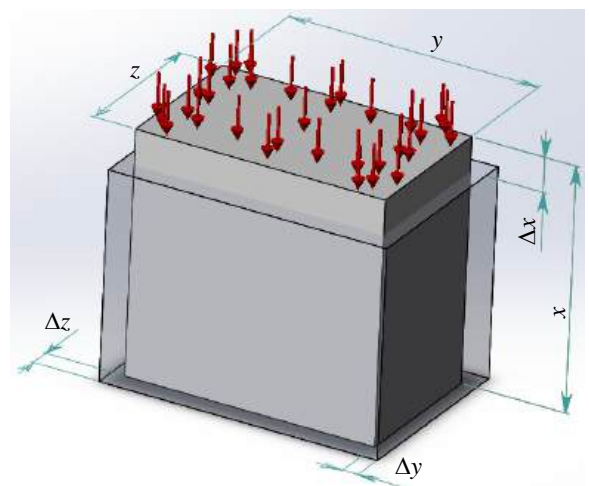


Рис. 4. Схема эксперимента Гука по одноосному сжатию элементарной ячейки АрПКМ

Изменяя выбор граней можно провести такое нагружение в направлении любой из осей координат.

Как было показано ранее [3], данный метод позволяет рассчитывать показатели нормальных упругих характеристик любых анизотропных структур с достаточно высокой точностью и с погрешностью менее $\sim 0,01\%$.

Определение сдвиговых характеристик

$$G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}$$

В случае изотропного материала определение модуля упругости при сдвиге не является независимой задачей [6], и его значение может быть получено из эксперимента сжатие—растяжение с использованием известного соотношения:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}. \quad (15)$$

Для анизотропной ортотропной модели АрПКМ ситуация существенно сложнее, и для определения этих характеристик требуется отдельный расчетный эксперимент с использованием методов САЕ.

В основе такого эксперимента может лежать известная схема эквивалентности напряжений сдвига и напряжений одновременного сжатия—растяжения в двух взаимно перпендикулярных направлениях с равными значениями напряжений (рис. 5).

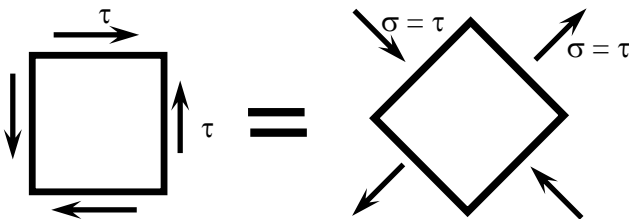


Рис. 5. Схема, демонстрирующая эквивалентность сдвиговых и одновременных сжимающих и растягивающих напряжений

Задача в этом случае становится формально двумерной. Однако для получения корректных результатов, элементарная структурная ячейка материала должна содержать всю информацию о параметрах структуры материала вдоль, формально не участвующей в расчетах, оси.

Таким образом, если для расчетов будет принята ячейка, которая была принята при моделировании нормальных нагружений, указанное условие будет выполнено автоматически.

Граничные условия, задаваемые в данном случае, будут выглядеть так, как показано на рис. 6.

Для выполнения первой группы ограничений для данного исследования все грани, кроме L и R (см. рис. 6), фиксируются путем ограничения перемещений, перпендикулярных данной грани.

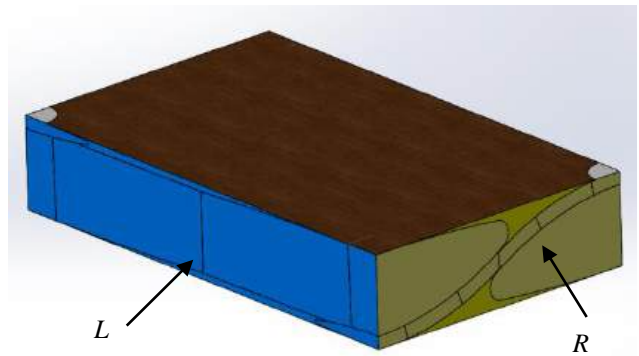


Рис. 6. Схема фиксации и нагружения исследуемой элементарной структурной ячейки АрПКМ при сдвиговых нагрузках

Для второй группы ограничений на оставшиеся две грани накладываются перемещения, например, сжимающие элементарную ячейку, к грани R , и растягивающие, к грани L , или наоборот.

Условия третьей группы ограничений в данном случае должны обеспечивать равенство напряжений вдоль осей, перпендикулярных этим граням.

Из условий третьей группы ограничений видно, что задача подбора является функцией одной переменной и может быть решена любым из известных способов решения таких задач, например методом хорд, который, учитывая линейность искомой функции, дает достаточно точный результат уже при третьей итерации.

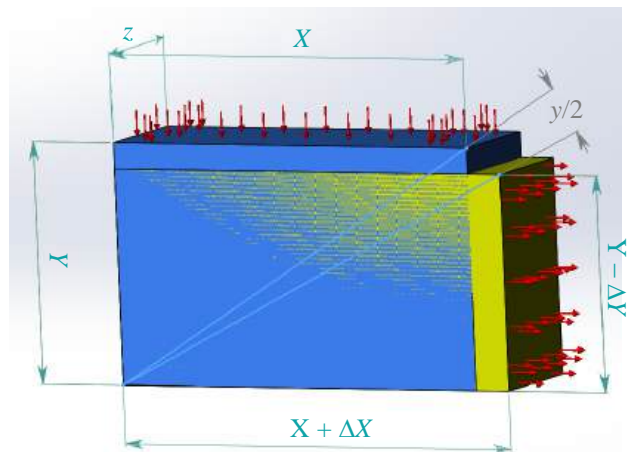


Рис. 7. Расчетная схема деформации сдвига исследуемой элементарной ячейки АрПКМ

Искомое значение модуля сдвига может быть получено из геометрических построений, приведенных на рис. 7.

$$\tau = \sigma = \frac{F_x}{xz} = \frac{F_y}{yz} \quad (16)$$

$$\frac{\gamma}{2} = \arctg\left(\frac{Y}{X}\right) - \arctg\left(\frac{Y - \Delta Y}{X + \Delta X}\right) \quad (17)$$

$$G_{xy}^{45} = \frac{\tau}{\gamma} \quad (18)$$

Принципиально важно в данном исследовании понимать, что значения модулей упругости при сдвиге исследуемой элементарной структурной ячейки относятся к осям, повернутым на 45° к граням ячейки в соответствии с условиями (см. рис. 5).

Для получения сдвиговых характеристик в других направлениях или для исследования зависимости сдвиговых характеристик от направления и угла сдвига следует лишь подготовить элементарную ячейку с необходимым направлением исследуемой структуры. Средства современных CAD-модулей позволяют выполнить любую такую задачу без особых затруднений.

Таким образом, впервые предложен алгоритм компьютерного моделирования экспериментов сжатия—растяжения анизотропных структур АрПКМ, позволяющий с высокой точностью рассчитывать все основные физико-механические характеристики ортотропной модели $E_x, E_y, E_z,$

$\mu_{xy}, \mu_{yz}, \mu_{xz}, G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}$ для структур любой произвольной формы еще на стадии проектирования изделий из АрПКМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарнопольский Ю. М., Жигун И. Г., Поляков В. А. Пространственно-армированные композиционные материалы: справочник. — М.: Машиностроение, 1987. — 224 с.
2. Ашкенази Е. Н., Ганов Э. В. Анизотропия конструкционных материалов: — Л.: Машиностроение, 1980. — 247 с.
3. Шалгунов С. И., Трофимов Д. А., Соколов В. И., Си-монов-Емельянов И. Д. Модель, анализ 3D-структуры и метод расчета физико-механических характеристик армированных полимерных композиционных материалов конструкции из композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2022. № 3. С. 10—14.
4. Лехницкий С. Г. Теория упругости анизотропного тела. — М.: Наука, 1977. — 416 с.
5. Корн Г. А., Корн Т. М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. — 832 с.
6. Рабинович А. Л. Введение в механику армированных полимеров. — М.: "НАУКА", 1970. — 482 с.

Algorithm for calculating effective elastic characteristics of anisotropic structures of reinforced plastics using CAE software packages

D. A. TROFIMOV, I. D. SIMONOV-EMEL'YANOV
FSBEIHE "MIREA — Russian Technological University"
(Institute of Fine Chemical Technologies named after M. V. Lomonosov),
Moscow, Russia

S. I. SHALGUNOV, V. I. SOKOLOV
АО "NPO Stekloplastik"
Moscow region, Solnechnogorsk district, settlement Andreevka, Russia

For the first time, an algorithm for calculating the elastic characteristics of an orthotropic model of anisotropic structures using CAE software packages is proposed. The algorithm is based on determining the effective elastic characteristics of an elementary 3-D cell of a reinforcing polymer composite material of arbitrary structure using the finite element method (FEM). The algorithm is characterized by high accuracy in determining all nine characteristics of the orthotropic model of the structure under study.

Keywords: elastic characteristics, orthotropic model, CAE, FEM, reinforced polymer composite materials.

УДК 533.601.1; 629.7

DOI: 10.52190/2073-2562_2023_4_28

EDN: BLKBFX

Оценка дисперсии производных коэффициента аэродинамического сопротивления по углам атаки и скольжения тела вращения с малыми случайными искажениями поверхности композитного теплозащитного материала при сверхзвуковом обтекании

¹ Ю. А. МОКИН, д-р физ.-мат. наук; ¹ С. Т. КАЛАШНИКОВ, канд. техн. наук; ^{1,2} Р. К. ШВАЛЕВА¹ Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
г. Миасс, Челябинская обл., Россия² АО «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева»,
г. Миасс, Челябинская обл., Россия

Рассмотрен один из проблемных вопросов определения аэродинамических характеристик скоростных спускаемых летательных аппаратов (СЛА), имеющих форму тела вращения с малыми случайными вариациями поверхности композитного теплозащитного покрытия (ТЗП) — вопрос оценки масштаба дисперсии производных коэффициента аэродинамического сопротивления по углам атаки и скольжения $D\{c_x^\alpha\}$, $D\{c_x^\beta\}$ в окрестности нулевого пространственного угла атаки в зависимости от определяющих параметров. На основе использования разложения вариации поверхности в ряд Фурье и для расчета вариаций давления на основе метода дифференциальной гипотезы локальности получено аналитическое интегральное решение поставленной задачи для тела вращения с заданной автокорреляционной функцией случайных вариаций его поверхности. Представлены графики, иллюстрирующие зависимость практически предельных значений величин c_x^α , c_x^β на уровне $3\sigma\{c_x^\alpha\}$ от степени корреляционной зависимости, для модельных автокорреляционных функций случайных искажений поверхности острого 30° конуса при его обтекании с $M_\infty \cong 10$. Проведен качественный анализ полученных зависимостей.

Ключевые слова: сверхзвуковое обтекание, тело вращения, коэффициент аэродинамического сопротивления, острый конус, композитный теплозащитный материал, слабая случайная вариация поверхности, малый угол атаки.

В числе проблемных вопросов определения аэродинамических характеристик тел вращения с малыми случайными пространственными искажениями внешней поверхности композитных теплозащитных материалов при сверхзвуковом и гиперзвуковом обтекании под малым пространственным углом атаки, рассмотренных в работе [1], отмечен вопрос оценки величин изменения продольной аэродинамической силы, характеризуемой зависимостью коэффициента сопротивления $c_x(\alpha, \beta)$ от углов атаки и скольжения для заданных параметров обтекания (параметры потока, числа Маха, Рейнольдса).

В работе [2] описана формальная схема моделирования указанной зависимости $c_x(\alpha, \beta)$ на основе формулы Тейлора второго порядка для функции двух аргументов и с использованием метода дифференциальной гипотезы локальности (ДГЛ) [3] получены аналитические интегральные выражения коэффициентов этой формулы. Эти коэффициенты в предположении случайного характера малых искажений поверхности ЛА также являются случайными величинами (СВ). В работе [4] в предположении известности автокорреляционной функции (АКФ) случайных вариаций поверхности предложена методика оценки дисперсии первого коэффициента формулы Тейлора — величины коэффициента сопротивления $c_x(0, 0)$ при нулевом пространственном угле атаки. В данной работе в продолжение и на основе результатов [2—4] разработана методика получения оценки дисперсии последующих коэффициентов формулы Тейлора — первых производных коэффициента $c_x(\alpha, \beta)$ по углам атаки (c_x^α) и скольжения (c_x^β).

Случайные искажения поверхности аналогично [4] характеризуются заданной АКФ. Модельный

Мокин Юрий Александрович, старший научный сотрудник.
E-mail: ofpat@mail.ru

Калашников Сергей Тимофеевич, начальник отдела "Фундаментальные проблемы аэрокосмических технологий".
E-mail: ofpat@mail.ru

Швалева Роза Камиловна, младший научный сотрудник, инженер I категории.
E-mail: src@makeyev.ru

Статья поступила в редакцию 16 августа 2023 г.

© Мокин Ю. А., Калашников С. Т., Швалева Р. К., 2023

характер иллюстративного примера обусловлен как выбором простейшей геометрии СЛА — в форме острого конуса, так и априорным выбором качественного вида нескольких конкретно использованных стационарных АКФ, отражающего общую тенденцию к ослаблению корреляционной зависимости с увеличением расстояния между рассматриваемыми точками поверхности.

Проблемный характер вопроса оценки изменения величин $c_x(\alpha, \beta)$ усугубляется в условиях неопределенности, отсутствия полной априорной информации о возможном качественном виде искажений поверхности, обусловленных многочисленностью влияющих факторов, в том числе — случайного характера. Практическая значимость получения рациональных оценок величин возмущающих аэродинамических сил и моментов для задач динамики СЛА отражена в [1—5]. В работе [5] приведены интегральные выражения для расчета производных c_x^α , c_x^β при обтекании неосесимметричных тел по теории Ньютона.

Вкратце опишем методический подход работ [2—4]. Уравнение поверхности тела вращения, затупленного или типа острого конуса, с малыми искажениями поверхности в цилиндрической системе координат (x, r, φ) , ось OX направлена от носка к торцу, представляется в виде:

$$r(x, \varphi) = y(x) + \varepsilon_r \cdot \delta r(x, \varphi), \quad (1)$$

$$0 \leq x \leq L; 0 \leq \varphi \leq 2\pi,$$

где $y(x)$ — уравнение образующей исходного тела;

$\delta r(x, \varphi)$ — слабая случайная вариация поверхности;

ε_r — параметр малости;

L — длина тела.

Для острого конуса $y(x) = px$, $p(x) = y'(x) = \tan \theta_s$, θ_s — угол наклона исходной образующей тела к оси OX .

Случайная функция (СФ) двух переменных $\delta r(x, \varphi)$ представлена тригонометрическим рядом Фурье

$$\delta r(x, \varphi) = \varepsilon_r \left\{ a_0(x) + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n(x) \cos n\varphi + b_n(x) \sin n\varphi] \right\}, \quad (2)$$

и характеризуется заданной АКФ $K_{\delta r}(x_1, x_2, \varphi_1, \varphi_2) = M \{ \delta r(x_1, \varphi_1) \delta r(x_2, \varphi_2) \}$, инвариантной относительно преобразований поворота на произвольный угол $\Delta\varphi$ и зеркального отражения, то есть — четной и стационарной по окружной координате.

Таким образом,

$$K_{\delta r}(x_1, x_2, \varphi_1, \varphi_2) \Rightarrow K_{\delta r}(x_1, x_2, \omega), \quad (3)$$

где $\omega = \varphi_2 - \varphi_1$.

АКФ (3) является функцией только трех аргументов, четной по ω и инвариантной относительно перестановки $x_1 \Leftrightarrow x_2$. $K_{\delta r}(x, x, 0) = D \{ \delta r(x, \varphi) \} = D_0(x) = \sigma_0^2(x)$ определяет дисперсию вариаций поверхности; $\sigma_0(x)$ — среднее квадратическое отклонение (СКО) вариаций поверхности. Все аэродинамические коэффициенты и их производные при заданных условиях обтекания тела с искажениями поверхности рассматриваются как случайные величины.

Рассмотрено обтекание тела вращения с малыми искажениями поверхности (1) с заданным числом Маха M_∞ при нулевом или малом угле атаки. В случае обтекания острого конуса предполагается реализация присоединенного скачка уплотнения, что гарантированно имеет место при $\theta_s \leq 50^\circ$. Для расчета аэродинамических коэффициентов использован метод ДГЛ [3].

Расчет коэффициента давления Φ на поверхности тела (1) в рамках метода [3] при малых углах атаки производится на основе зависимости типа формулы Тейлора

$$\Phi(x, \varphi) \approx \Phi(x) + \Phi_t(x) \Delta t + \frac{1}{2} \Phi_{tt}(x) \Delta t^2, \quad (4)$$

где $t = \tan(\alpha_m)$ — тангенс местного угла атаки; $\Delta t = t(x, \varphi) - p(x)$; $\Phi(x), \Phi_t(x), \Phi_{tt}(x)$ — коэффициенты-функции (4), вычисляемые для заданных условий обтекания, для исходного контура тела с использованием "точных" методов и программ.

Зависимость коэффициента давления Φ от угла θ_s на поверхности острого конуса для заданных условий обтекания предполагается заданной в виде дважды дифференцируемой функции $\Phi = \Phi(p)$. Расчет коэффициента давления на искаженной поверхности острого конуса (1) при малом угле атаки проведен в рамках метода касательных конусов с использованием заданной функции в форме $\Phi = \Phi(t)$. Последнее позволяет применить для расчета коэффициента Φ на поверхности конуса (1) зависимость в формате метода [3]

$$\Phi(x, \varphi) \approx \Phi(p) + \Phi_t(p) \Delta t + (1/2) \Phi_{tt}(p) \Delta t^2, \quad (4')$$

$$p = \text{const}; \Delta t = \Delta t(x, \varphi),$$

где $\Phi_t = \Phi_p$; $\Phi_{tt} = \Phi_{pp}$. При сверхзвуковых и гиперзвуковых скоростях для расчета коэффициента давления $\Phi(p)$ на поверхности острого конуса мо-

гут быть использованы, например, приближенные зависимости работы [6] или других работ. Для острого конуса с фиксированным углом θ_s для заданных условий обтекания величины Φ , Φ_t , Φ_n в (4') не зависят от продольной координаты x , являясь постоянными.

Формула Тейлора, предложенная в [4] для моделирования коэффициента сопротивления СЛА (1) с малыми искажениями поверхности при малых углах атаки и скольжения, имеет вид

$$c_x(\alpha, \beta) = c_x(0,0) + c_x^\alpha \alpha + c_x^\beta \beta + \frac{c_x^{\alpha\alpha} \alpha^2 + 2c_x^{\alpha\beta} \alpha \beta + c_x^{\beta\beta} \beta^2}{2}. \quad (5)$$

Левая часть (2) — СФ двух аргументов, аналогично и коэффициенты-функции $a_n(x)$, $b_n(x)$ в правой части (2) являются СФ. Коэффициент $a_0(x)$ в (2) определяет "отклонение размера" [7] — осесимметричную составляющую искажения поверхности тела (1), определяющую главную часть приращения первого члена $c_x(0, 0)$ в (5), но не влияющую на главную часть производных c_x^α , c_x^β [4], поэтому в данной работе предполагаем, что

$$a_0(x) = 0. \quad (6)$$

Для цилиндрических и цилиндроконических деталей величины $a_1(x)$, $b_1(x)$ определяют смещения центров нормальных круговых сечений относительно продольной оси по длине детали [7]. Именно соответствующие гармоники первого порядка ряда (2) определяют главные части производных c_x^α , c_x^β , имеющих первый порядок малости по ε_r [4] и равных нулю для исходной симметричной формы тела.

Представим АКФ (3) с учетом её четности по ω и условия (6) рядом Фурье

$$K_{\delta r}(x, u, \omega) = \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n(x, u) \cdot \cos n\omega, \quad x, u \in [0, L]. \quad (7)$$

Можно показать [8], что при наложенных выше условиях на статистические свойства вариаций поверхности для коэффициентов-функций в (2) справедливы соотношения

$$\begin{cases} M\{a_n(x)\} = M\{b_n(x)\} = 0, & x \in [0, L]; n = 1, 2, \dots; \\ M\{a_n(x)b_k(u)\} = 0, & x, u \in [0, L]; n, k = 1, 2, \dots; \\ M\{a_n(x)a_k(u)\} = M\{b_n(x)b_k(u)\} = \delta_{n,k} \lambda_n(x, u). \end{cases} \quad (8)$$

То есть — указанные коэффициенты корреляционно независимые СФ с АКФ $\lambda_n(x, u)$ из разложения (7); $\delta_{n,k}$ — символ Кронекера.

Выражение главной части производной c_x^α , полученное [4] на основе метода ДГЛ [3], имеет вид

$$c_x^\alpha = \frac{-1 \cdot \varepsilon_r}{R_m^2} \times \int_0^L \left[\Phi_n(x) y(x) y'(x) (1 + y'^2(x)) + \Phi_t(x) y(x) (1 + 3y'^2(x)) \right] a_1'(x) dx, \quad (9)$$

где R_m — радиус миделевого сечения тела.

С учетом соображений симметрии справедливы равенства: для математического ожидания — $M\{c_x^\alpha\} = M\{c_x^\beta\} = 0$; для дисперсии — $D\{c_x^\alpha\} = D\{c_x^\beta\}$.

Математическое ожидание квадрата правой части (9) определяет искомую дисперсию $D\{c_x^\alpha\}$.

С учетом (8) на основе [9] получено интегральное соотношение

$$D\{c_x^\alpha\} = \frac{\varepsilon_r^2}{R_m^4} \int_0^L \int_0^L F(x) F(u) \frac{\partial^2 \lambda_1(x, u)}{\partial x \partial u} du dx, \quad (10)$$

где

$$F(x) = \Phi_n(x) y(x) y'(x) (1 + y'^2(x)) + \Phi_t(x) y(x) [1 + 3y'^2(x)]. \quad (11)$$

Для частного случая острого конуса подынтегральная функция (11) линейна и имеет вид

$$F(x) = \hat{\Phi} \cdot x, \quad \text{где } \hat{\Phi} = \Phi_n p^2 (1 + p^2) + \Phi_t p (1 + 3p^2). \quad (12)$$

Коэффициент пропорциональности $\hat{\Phi}$ в (12) в рамках метода ДГЛ зависит от угла конуса θ_s и числа Маха M_∞ , а в более узких рамках теории Ньютона — только от угла конуса в соответствии с выражением $\hat{\Phi}_{New} = 8p^2 / (1 + p^2)^2 = 2\sin^2 2\theta_s$.

Двойной интеграл (10) определяет общее аналитическое решение поставленной задачи. Для частного случая обтекания острого конуса (1) формула (10) принимает вид

$$D\{c_x^\alpha\} = \frac{\varepsilon_r^2 \hat{\Phi}^2}{R_m^4} \int_0^L \int_0^L x u \frac{\partial^2 \lambda_1(x, u)}{\partial x \partial u} du dx. \quad (13)$$

Совместный анализ выражения (9) и соответствующего выражения величины коэффициента возмущающей нормальной силы c_{y0} работы [10]

для произвольного контура тела $y(x)$ в рамках теории Ньютона показывает и подтверждает наличие связи между коэффициентами c_x^α и c_{y0} :

$$c_{x\text{New}}^\alpha = 2c_{y0\text{New}},$$

указанной в работе [5] для тел произвольной формы. Анализ же выражения (9) и соответствующего выражения коэффициента c_{y0} [10] для острого конуса в существенно более широких рамках метода ДГЛ также указывает на наличие линейной связи между указанными коэффициентами

$$c_x^\alpha = K c_{y0},$$

$$\text{где } K = (1 + 3p^2) + p(1 + p^2)(\Phi_\pi / \Phi_t). \quad (14)$$

Отношение производных $\tilde{\Phi} \stackrel{\text{def}}{=} (\Phi_\pi / \Phi_t)$, фактически логарифмическая производная первой производной функции давления, определено в работах [11, 12] как отдельный существенный параметр подобия при решении задачи оценки изменения положения центра давления острого конуса при малых вариациях его поверхности, в последней приведены и численные оценки величины $\tilde{\Phi}$ для различных углов конуса и чисел Маха. Величина параметра $\tilde{\Phi}$ имеет существенное значение и при определении величины и направления момента крена косою обдувки притупленных тел с эллиптическим поперечным сечением [13]. Данная работа ещё раз подтверждает востребованность и важность параметра $\tilde{\Phi}$ в задачах аэродинамики тел вращения с малыми искажениями поверхности. В рамках теории Ньютона $\tilde{\Phi}_{\text{New}} = (1 - 3p^2) / [p(1 + p^2)]$ и в формуле (14) $K_{\text{New}} = 2$.

Используем выражение (13) для оценки дисперсии $D\{c_x^\alpha\}$ для острого конуса с углом $\theta_s = 30^\circ$ со случайными смещениями центров круговых сечений поверхности, характеризуемыми модельными двухпараметрическими АКФ трех видов:

$$\lambda_1(x, u) = \sigma_0^2 e^{-|x-u|/(\tau L)}; \quad x, u \in [0, L], \quad (15)$$

$$\lambda_1(x, u) = \sigma_0^2 \left(xu / L^2 \right) e^{-|x-u|/(\tau L)}; \quad x, u \in [0, L], \quad (16)$$

$$\lambda_1(x, u) = \sigma_0^2 e^{-|x-u|/(\tau L)} \cos(\pi(x-u)/L); \quad x, u \in [0, L]. \quad (17)$$

АКФ (15) описывает искажения поверхности с постоянной дисперсией $D\{a_1(x)\} = \sigma_0^2 = \text{const}$ по длине конуса. Линейный параметр СКО σ_0 — вы-

берем постоянным из условия: $3\sigma_0 = 0,01R_M$, при этом практически предельная величина искажений поверхности составляет 1 % радиуса миделевого сечения. Предполагаем, что корреляционная зависимость искажений поверхности в различных сечениях стационарна также и по продольной координате и убывает с увеличением расстояния между ними по экспоненциальному закону. Вторым безразмерным параметром $0 < \tau < \infty$ определяет скорость уменьшения корреляционной зависимости вариаций поверхности с увеличением расстояния между сечениями. Например, при $\tau = 1$ коэффициент корреляции величин СФ $a_1(x)$ в начале и середине конуса равен $k \cong 0,607$, а в начале и конце конуса — $k \cong 0,368$. При малых величинах τ ($\tau \rightarrow +0$) корреляция быстро уменьшается, а при $\tau \rightarrow \infty$ коэффициент корреляции приближается к единице по всей длине конуса. В последнем случае искажение поверхности становится эквивалентным малому случайному смещению конуса как жесткого тела по направлению оси y .

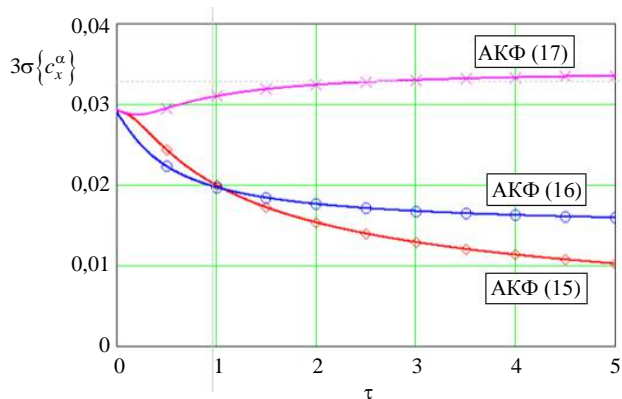
Функция (16) в отличие от предыдущей описывает искажения поверхности конуса с линейной зависимостью СКО $\sigma_0(x) = \sigma_0(x/L)$. При указанной ранее величине σ_0 практически предельная величина искажений поверхности составляет 1 % текущего радиуса конуса. Нормированные АКФ для зависимостей (15) и (16) идентичны, коэффициент корреляции при $\tau \rightarrow +0$ и $\tau \rightarrow \infty$ изменяется аналогично. Однако, в отличие от предыдущего, искажения поверхности при $\tau \rightarrow \infty$ становятся близкими к случайному повороту конуса на малый угол α^* относительно оси z , проходящей через его вершину. Угол α^* имеет нулевое математическое ожидание и СКО, равное

$$3\sigma\{\alpha^*\} \approx \left(\frac{3\sigma_0}{L} \right) \cos^2 \theta_s = 0,00433.$$

Геометрические свойства искажений поверхности конуса, описываемых АКФ (17), приведены в [4].

Коэффициенты формулы (4') для острого конуса с углом $\theta_s = 30^\circ$ при числе Маха $M_\infty = 10$ приближенно равны $\Phi \cong 0,527$, $\Phi_t \cong 1,35$, $\Phi_\pi \cong -0,120$; в соответствии с формулой (12) $\hat{\Phi} = 1,679$. Результаты вычислений по формуле (13) с АКФ (15), (16), (17) представлены на рисунке в форме $3\sigma\{c_x^\alpha\}(\tau) = 3\sqrt{D\{c_x^\alpha\}}$, характеризующей практи-

чески предельный диапазон изменения СВ c_x^α при определенных практически предельных диапазонах вариаций поверхности, в зависимости от параметра τ .



Графики $3\sigma\{c_x^\alpha\}(\tau)$ практически предельных уровней

производной c_x^α для острого конуса $\theta = 30^\circ$ при $M_\infty = 10$ для случайных вариаций его поверхности, описываемых автокорреляционными функциями (15), (16), (17) в зависимости от параметра τ

При $\tau \rightarrow +0$ все три кривые приближаются к предельному значению $3\sigma\{c_x^\alpha\} = \hat{\Phi}\left(\frac{3\sigma_0}{R_m}\right) / p = 0,0291$. С физической точки зрения этот неочевидный результат можно трактовать как утверждение о том, что при исчезающе малой корреляции вариаций поверхности главная часть производной c_x^α вне зависимости от вида АКФ определяется вариацией поверхности в окрестности кормового сечения конуса.

При $\tau \rightarrow \infty$ каждая из кривых на рисунке асимптотически приближается к своему предельному значению. Для АКФ (15) $\lim_{\tau \rightarrow \infty} \sigma\{c_x^\alpha\} = +0$, что соответствует указанной предельной геометрии искажения поверхности конуса.

Для АКФ (16) $\lim_{\tau \rightarrow \infty} 3\sigma\{c_x^\alpha\} = 0,0145$, что также точно соответствует величине модуля коэффициента c_x^α (9) для $a_1(x) = 3\sigma_0 x / L$. Для АКФ (17) $\lim_{\tau \rightarrow \infty} 3\sigma\{c_x^\alpha\} = 0,0344$, что более чем в два раза выше предыдущей оценки. Последний факт обусловлен и объясняется отрицательной корреляцией величин вариации поверхности $\{a_1(x)\}$ в начале и конце конуса для АКФ (17), способствующей увеличению модуля интеграла (9).

Величина $3\sigma\{c_x^\alpha\}(\tau)$ для АКФ (15) и (16) при $\tau \rightarrow \infty$ приближается к своему предельному значению монотонно убывая, сверху; а для АКФ (17) возрастая.

Соответствие оценок дисперсии коэффициента c_x^α для модельных АКФ в предельных случаях при

$\tau \rightarrow 0$ и $\tau \rightarrow \infty$ ожидаемым величинам, полученным на основе детерминированного подхода, может рассматриваться в качестве условной "верификации" разработанной методики. Подтвержденное соответствие делает более правдоподобными результаты оценок, проведенные описанным способом, и для промежуточных значений параметра τ для острого конуса, и, в более широком плане, для тел вращения иной исходной формы и возможных АКФ других типов. Аналогичные оценки справедливы и для дисперсии $D\{c_x^\beta\}$.

Выводы

Разработана методика и представлено в аналитической интегральной форме общее решение задачи определения дисперсии производных аэродинамического коэффициента сопротивления $D\{c_x^\alpha\}$, $D\{c_x^\beta\}$ тела вращения с заданной АКФ малых случайных искажений поверхности композитного теплозащитного покрытия при сверхзвуковом обтекании.

Получены численные оценки дисперсии $D\{c_x^\alpha\}$, $D\{c_x^\beta\}$, СКО для острого конуса с углом $\theta_s = 30^\circ$ при числе Маха $M_\infty \cong 10$ для трех модельных АКФ случайных вариаций его поверхности.

Проведен иллюстративный качественный анализ различных возможных видов зависимости дисперсии $D\{c_x^\alpha\}$, $D\{c_x^\beta\}$, СКО от степени и вида корреляционной зависимости случайных вариаций поверхности острого конуса для заданных условий обтекания. Подтверждена существенность влияния вида корреляционной зависимости вариаций поверхности на дисперсию аэродинамических коэффициентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Degtyar V. G., Kalaschnikov S. T., Mokin Yu. A. On problem of analyzing aerodynamic properties of blunted rotary bodies with small random surface distortions under supersonic and hypersonic flows. // Proceedings of the XXV Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter (NEPCSM 2017), AIP Conf. Proc. 1893, 020004-1–020004-6. <https://doi.org/10.1063/1.5007442>.
2. Мокін Ю. А., Калашников С. Т., Швалева Р. К. О моделировании аэродинамического коэффициента сопротивления тела вращения с малыми искажениями поверхности композитного теплозащитного покрытия при сверхзвуковом обтекании // Конструкции из композиционных материалов. 2023. № 4. С. 11–17.
3. Мокін Ю. А. О возможностях решения задач гиперзвуковой аэродинамики на основе дифференциальной формы представления обобщенной гипотезы локальности и ее композиции с точными численными методами // Космонавтика и ракетостроение. 2008. Вып. 2(51). С. 136–145.

4. Мокин Ю. А., Калашников С. Т., Швалева Р. К. Оценка дисперсии аэродинамического коэффициента сопротивления тела вращения с малыми случайными искажениями поверхности композитного теплозащитного покрытия при сверхзвуковом обтекании // Конструкции из композиционных материалов. 2022. Вып. 1(165). С. 5—10.
5. Липницкий Ю. М., Красильников А. В., Покровский А. Н., Шманенков В. Н. Нестационарная аэродинамика баллистического полета. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 176 с.
6. Краснов Н. Ф., Кошевой В. Н., Данилов А. Н., Захарченко В. Ф. Аэродинамика ракет / под ред. Краснова Н. Ф. — М.: Высш. шк. 1968. — 772 с.
7. Бородачев Н. А., Абдрашитов Р. М., Веселова И. М., Колемаев В. А., Курапов А. Н., Райбман Н. С., Сизенов Л. К. Точность производства в машиностроении и приборостроении / под ред. Гаврилова А. Н. — М.: Машиностроение, 1973. — 567 с.
8. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1964. — 464 с.
9. Абзгауз Г. Г., Тронь А. П., Копенкин Ю. Н., Корovina И. А. Справочник по вероятностным расчетам. — М.: Воениздат, 1970. — 536 с.
10. Мокин Ю. А., Калашников С. Т., Швалева Р. К. Оценка дисперсии коэффициента возмущающей аэродинамической нормальной силы тела вращения с малыми случайными искажениями поверхности композитного теплозащитного покрытия при сверхзвуковом обтекании // Конструкции из композиционных материалов. 2020. № 3(159). С. 3—8.
11. Мокин Ю. А. Оценка возможных изменений положения центра давления острого конуса за счет малого изменения формы при сверхзвуковом и гиперзвуковом обтекании: мат. XX Юбилейной Междунар. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСПП'2017), 24—31 мая 2017, Алушта. — М.: Изд-во МАИ, 2017. С. 513—515.
12. Мокин Ю. А., Киселев В. И., Мещанов А. С. Анализ влияния малого изменения формы острого конуса на положение его центра давления при сверхзвуковом и гиперзвуковом обтекании с малым углом атаки // Изв. вузов. Авиационная техника. 2019. № 4. С. 91—97.
13. Мокин Ю. А. Анализ особенностей поведения аэродинамического момента крена при гиперзвуковом обтекании затупленных тел с эллиптическим поперечным сечением // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2010. № 4(12). С. 109—115.

Estimate of variance of derivatives of an aerodynamic drag coefficient with respect to attack and yaw angles of a rotary body with small irregular surface distortions of a composite thermal protection coating at supersonic flow

¹ Yu. A. MOKIN, ¹ S. T. KALASHNIKOV, ^{1,2} P. K. SHVALEVA

¹ South Ural Federal Scientific Centre of Minerology and Eco-Geology of the Ural Division of RAS,
Miass, Chelyabinsk Region, Russia

² Joint Stock Company "Academician V. P. Makeyev State Rocket Centre",
Miass, Chelyabinsk Region, Russia

The article is devoted to one of acute issues of definition of aerodynamic coefficients of high-speed re-entry vehicles (RVs) of the rotary-body shape with small irregular surface distortions of a composite thermal protection coating, i.e. an issue of assessment of a scale of variance of derivatives of an aerodynamic drag coefficient $D\{c_x^\alpha\}$, $D\{c_x^\beta\}$ with respect to attack and yaw angles versus governing parameters in the vicinity to zero spacial attack angle. An analytical integral solution of a set modeled problem for a rotary body with a given autocorrelated function of irregular distortions of its surface is obtained on the basis of Fourier expansion of the surface distortion and a method of differential locality hypothesis used to evaluate pressure variations. Curves of practically ultimate values c_x^α , c_x^β at $3\sigma\{c_x^\alpha\}$, versus a degree of correlation dependence for modeled autocorrelated functions of irregular surface distortions of a sharp 30° -cone flown around at $M_\infty \cong 10$ are provided. The obtained curves are qualitatively analyzed.

Keywords: supersonic flow, rotary body, aerodynamic drag coefficient, sharp cone, composite thermal protection material, small irregular surface distortion, small attack angle.

УДК 538.95

DOI: 10.52190/2073-2562_2023_4_34

END: CCSSKH

Влияние метода изготовления интеллектуальных композиционных материалов для частотно-селективных устройств на формирование корреляционных связей "элементный состав—фазозёрненная структура—макроотклики"

^{1,2} К. П. АНДРЮШИН, канд. физ.-мат. наук; ¹ С. И. ДУДКИНА; ¹ Л. А. ШИЛКИНА;

³ А. В. НАГАЕНКО, канд. техн. наук; ¹ И. Н. АНДРЮШИНА, канд. физ.-мат. наук;

^{2,4} С. В. ХАСБУЛАТОВ, канд. физ.-мат. наук; ¹ Л. А. РЕЗНИЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук

¹ Научно-исследовательский институт физики, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

² Комплексный научно-исследовательский институт им. Х. И. Ибрагимова РАН, г. Грозный, Россия

³ Институт высоких технологий и пьезотехники, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

⁴ Чеченский государственный университет им. А. А. Кадырова, г. Грозный, Россия

Изготовлены два сегнетопъезоэлектрических материала для частотно-селективных устройств двухстадийным твердофазным синтезом с последующим спеканием по обычной керамической технологии и горячим прессованием. Проведено комплексное исследование их электрофизических свойств. Показана сопоставимость электрофизических параметров этих материалов, в том числе стабильности резонансной частоты, при изготовлении их разными методами. Это позволяет рекомендовать традиционный метод изготовления подобных материалов без использования дорогостоящего горячего прессования.

Ключевые слова: сегнетопъезоэлектрические материалы, технологии, стабильность резонансной частоты.

В мировом производстве функциональных материалов достигнут важный технологический предел использования традиционных керамических и композиционных сред, свойства которых организуют и конструируют таким образом, чтобы они могли удовлетворять конкретному назначению (исполняемой функции) контролируемым образом [1—3].

Одним из современных трендов становится направление, связанное с интеллектуализацией элементной базы, т. е. с переходом к конкурентоспособным материалам третьего поколения, способным преобразовывать один вид энергии в другой, самодиагностировать свой статус, противодействовать внешним факторам и адаптироваться к ним после оценки характера оказываемых воздействий и собственного состояния (активные, или интеллектуальные материалы) [4—15]. Поскольку на современном этапе развития аэрокосмических технологий предъявляются жесткие требования к рабочим характеристикам используемых в них сред, принимаются активные попытки разработать новые композиции либо детально исследовать и усовершенствовать уже известные, в том числе с высокой стабильностью резонансной частоты, применяющиеся в частотно-селективных устройствах в качестве фильтров с варьiruемой шириной полосы пропускания. Анализ литературы показал, что в качестве их основ выступают сегнетожесткие (СЖ) сегнетопъезоэлектрические материалы (СПМ) на основе твердых растворов (ТР) системы $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ (ЦТС) [16]. Важнейшие требования, предъявляемые к ним, — высокая стабильность резонансной частоты, $\delta f_0/f_r$, где f_0 — значение резонансной частоты образца при текущей температуре, f_r — значение резонансной частоты образца при комнатной температуре.

Андрюшин Константин Петрович, ведущий научный сотрудник отдела "Интеллектуальные материалы и нанотехнологии", старший научный сотрудник.

E-mail: kpandryushin@gmail.com

Дудкина Светлана Ивановна, научный сотрудник отдела "Интеллектуальные материалы и нанотехнологии".

E-mail: s.i.dudkina@yandex.ru

Шилкина Лидия Александровна, старший научный сотрудник.

E-mail: lid-shilkina@yandex.ru

Нагаенко Александр Владимирович, доцент кафедры.

E-mail: nagaenko@sfedu.ru

Андрюшина Инна Николаевна, старший научный сотрудник отдела "Интеллектуальные материалы и нанотехнологии".

E-mail: futur6@mail.ru

Хасбулатов Сидек Вахаевич, старший научный сотрудник, доцент.

E-mail: sidek80@bk.ru

Резниченко Лариса Андреевна, заведующая отделом "Интеллектуальные материалы и нанотехнологии", профессор.

E-mail: lareznichenko@sfedu.ru

Статья поступила в редакцию 30 июня 2023 г.

© Андрюшин К. П., Дудкина С. И., Шилкина Л. А., Нагаенко А. В., Андрюшина И. Н., Хасбулатов С. В., Резниченко Л. А., 2023

Принимая во внимание, что разработка нового поколения высокоэффективных СПМ и усовершенствование технологий их производства непосредственно связаны с решением фундаментальной проблемы материаловедения сегнетоэлектриков: определением закономерностей формирования их физических свойств и возможностей управления ими с помощью внешних воздействий; — актуальным представляется проведение исследований, направленных на выявление корреляционных связей между элементарным составом, фазовым наполнением, зеренной структурой и макрооткликами в группе СЖ (фильтровых) материалов и установление зависимости этого квартета характеристик от метода изготовления таких СПМ.

Объекты исследования, методы их изготовления и диагностики свойств

В качестве объектов исследования использованы функциональные материалы на основе системы ЦТС — ПКР-13 (1), ПКР-80 (2) с высокой стабильностью резонансной частоты, изготовленные двухстадийным твердофазным синтезом с последующим спеканием по обычной керамической технологии (ОКТ) (без извне приложенного давления, P) и методом горячего прессования (ГП, с приложением P). Технологические регламенты синтеза: $T_{\text{синт.1}} = 1123 \text{ K}$, $T_{\text{синт.2}} = 1143 \text{ K}$, $\tau_1 = \tau_2 = 6 \text{ ч}$; спекания: по ОКТ — $T_{\text{сп.}} = 1490 \text{ K}$ (1), $T_{\text{сп.}} = 1410 \text{ K}$ (2), $\tau = 2 \text{ ч}$; горячим прессованием: (1) — $T_{\text{сп.}} = 1450 \text{ K}$, $\tau_{\text{сп.}} = 2 \text{ ч}$, $P = 20 \text{ МПа}$; (2) — $T_{\text{сп.}} = 1423 \text{ K}$, $\tau_{\text{сп.}} = 0,66 \text{ ч}$, $P = 20 \text{ МПа}$. В качестве исходных реагентов использовались оксиды следующих квалификаций: PbO , ZrO_2 , TiO_2 , Nb_2O_5 , MnO_2 — "ч", ZnO — "ч. д. а." (где "ч" — чистый, "ч. д. а." — чистый для анализа). Спекание синтезированных заготовок методом ГП осуществляли с помощью модернизированной установки УГПЭ-2 [17].

Поисковые измерительные образцы изготавливали в виде дисков ($\varnothing 10 \times 1 \text{ мм}$ или $\varnothing 10 \times 0,5 \text{ мм}$). Обработку поверхностей производили алмазным инструментом по 6-му классу точности.

Электроды на спеченные керамические заготовки наносили на плоские поверхности образцов двукратным вжиганием серебряносодержащей пасты при температуре 1073 K в течение $0,5 \text{ ч}$.

Использовали метод "горячей" поляризации, заключающийся в том, что электрическое поле к образцам прикладывается при высокой температуре [17]. Образцы загружали в камеру с полиэтиленсилоксановой жидкостью ПЭС-5 при $\sim 297 \text{ K}$, в течение $0,5 \text{ ч}$ осуществлялся плавный подъем температуры до 423 K , сопровождающийся увеличением

создаваемого поля от 0 до $3 \dots 4 \text{ кВ/мм}$ в зависимости от состава. В этих условиях образцы выдерживались $20 \text{—} 25 \text{ мин}$ и затем охлаждались под полем до $\sim 297 \text{ K}$ (комнатная температура).

Рентгенографические исследования при комнатной температуре проводились методом порошковой дифракции с использованием дифрактометра ДРОН-3 (отфильтрованное CoK_α -излучение, схема фокусировки по Брэггу—Брентано). Исследовали измельченные керамические объекты, что позволило исключить влияние поверхностных эффектов, напряжений и текстур, возникающих в процессе получения керамик. Расчет параметров перовскитовой ячейки и однородного параметра деформации (δ), характеризующего величину спонтанной деформации, проводили по формулам, соответствующим реализованным симметриям кристаллической решетки [17].

Определение экспериментальной плотности ($\rho_{\text{эксп}}$) образцов осуществляли методом гидростатического взвешивания, где в качестве жидкой среды использовали октан. Плотность рассчитывали по формуле $\rho_{\text{эксп}} = (\rho_{\text{окт}} \times m_1) / (m_2 - m_3 + m_4)$, где $\rho_{\text{окт}}$ — плотность октана, m_1 — масса сухой заготовки, m_2 — масса заготовки, насыщенной октаном, m_3 — масса насыщенной заготовки, взвешенной в октане с подвесом, m_4 — масса подвеса для заготовки. Расчет рентгеновской плотности ($\rho_{\text{рентг}}$) производили по формуле: $\rho_{\text{рентг}} = 1,66 M/V$, где M — вес формульной единицы в граммах, V — объем перовскитной ячейки в \AA . Относительную плотность ($\rho_{\text{отн}}$) рассчитывали по формуле $(\rho_{\text{эксп}}/\rho_{\text{рентг}}) \cdot 100 \%$.

Для исследования микроструктуры сколов образцов использовался сканирующий электронный микроскоп JSM-6390L (Япония) с системой микроанализаторов фирмы Oxford Instruments (Великобритания). Разрешение микроскопа до $1,2 \text{ нм}$ при ускоряющем напряжении 30 кВ (изображение во вторичных электронах), пределы ускоряющего напряжения — от $0,5$ до 30 кВ , увеличение от $\times 10$ до $\times 1000000$, ток пучка до 200 нА .

Измерения электрофизических параметров образцов при $T = 300 \text{ K}$ проводили с использованием прецизионного LCR — метра Agilent 4980A методом резонанса — антирезонанса [18]. При этом определяли относительную диэлектрическую проницаемость поляризованных образцов ($\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$), диэлектрические потери в слабом поле (тангенс угла диэлектрических потерь, $\text{tg}\delta$), пьезомодуль ($|d_{31}|$), пьезоэлектрический коэффициент (пьезочувствительность, $|g_{31}|$), коэффициент электромеханической связи планарной моды колебаний (K_p), механическую добротность (Q_m). Пьезомодуль d_{33} и, соответственно, пьезоэлектрический коэффициент

g_{33} определяли при комнатной температуре квазистатическим методом при помощи прибора Piezo d_{33} Test System (YE2730A d_{33} METER). Погрешности измерений электрофизических параметров имеют следующие величины: $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0 \leq \pm 1,5 \%$, $K_p \leq \pm 2,0 \%$, $|d_{31}| \leq \pm 4,0 \%$, $d_{33} \leq \pm 10 \%$, $Q_m \leq \pm 12 \%$.

Экспериментальные результаты, обсуждение

Рентгенофазовый анализ показал, что все образцы, содержащие очень малое количество не вошедшего в реакцию ZrO_2 , относительная интенсивность сильной линии которого не превышает 2 %, кристаллизуются в структуре типа перовскита и имеют тетрагональную (Т) симметрию [19].

На рис. 1 представлены рентгенограммы материалов ПКР-13 (1), ПКР-80 (2), изготовленных методами ОКТ и ГП (см. рис. 1, а) и фрагменты рент-

генограмм, включающие дифракционные линии 111, 002 и 200, в большем масштабе по 2θ , материалов (1), (2), изготовленных по ОКТ, (см. рис. 1, б).

На рис. 1, а видно, что ширина рентгеновских линий материалов, изготовленных по ОКТ, меньше, чем изготовленных методом ГП, что говорит об их более высокой химической однородности (значения B_{111} приведены в табл. 1).

На рис. 1, б видно, что линия 002 ТР (1) расщепляется на два пика, при этом линия 200 остается одиночной. Аналогичный эффект наблюдался нами при исследовании ТР системы $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$ [20, 21] и свидетельствует о том, что в ТР сосуществуют две Т-фазы (T_1 и T_2), немного отличающиеся параметром c . ТР (2), в отличие от ТР (1), является однофазным. Повышение фона между линиями 002 и 200 может быть связано с присутствием в образцах кластеров моноклинной фазы, являющейся промежуточной при $T \rightarrow$ ромбоэдрическом (Рэ) переходе [13, 22, 23].

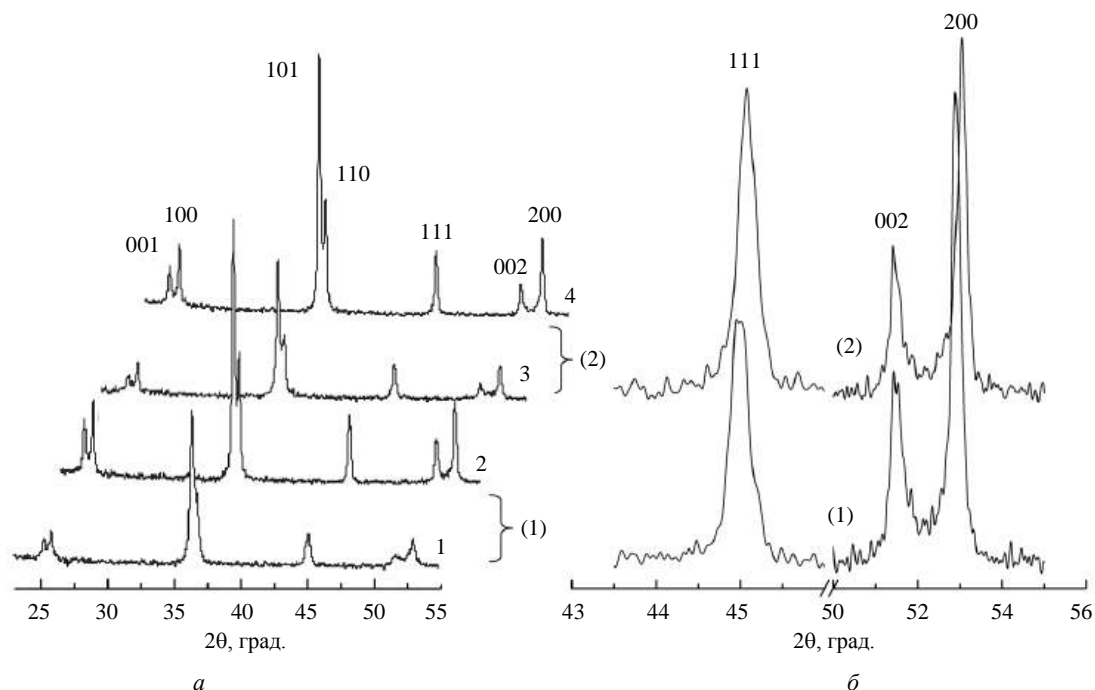


Рис. 1. Рентгенограммы материалов ПКР13 (1) и ПКР80 (2), изготовленных методами ГП (1, 3) и ОКТ (2, 4) (а). Фрагменты рентгенограмм материалов (1) и (2), изготовленных по ОКТ, включающие дифракционные линии 111, 002 и 200 (б)

Таблица 1

Характеристики структуры, микроструктуры, плотности керамических материалов (1) и (2), полученных по ОКТ и ГП

| Материал, метод получения | Параметры ячейки | | $(c/a - 1) \cdot 10^3$ | $\delta \cdot 10^3$ | $V, \text{\AA}^3$ | $B_{111}, \text{град}$ | $\rho_{\text{эксп}}, \text{г/см}^3$ | $\rho_{\text{рентг}}, \text{г/см}^3$ | $\rho_{\text{отн}}, \%$ | $\bar{D}, \text{мкм}$ |
|---------------------------|------------------|-----------------|------------------------|---------------------|-------------------|------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| | $a, \text{\AA}$ | $c, \text{\AA}$ | | | | | | | | |
| (1), ОКТ | $T_1 - 4,026$ | 4,132 | 26 | 17 | 67,04 | 0,24 | 7,69 | 8,08 | 95,17 | 3 |
| | $T_2 - 4,026$ | 4,125 | 24 | 16 | 66,92 | | | | | |
| (1), ГП | 4,025 | 4,118 | 23 | 15 | 66,72 | 0,36 | 8,00 | 8,07 | 99,13 | 2 |
| (2), ОКТ | 4,019 | 4,131 | 28 | 18 | 66,71 | 0,23 | 7,64 | 8,10 | 94,31 | 10 |
| (2), ГП | 4,017 | 4,122 | 26 | 17 | 66,52 | 0,27 | 8,00 | 8,07 | 99,07 | 5 |

В табл. 1 приведены параметры Т-ячейки, B_{111} и плотности керамик ($\rho_{\text{эксп}}$, $\rho_{\text{рентг}}$ и $\rho_{\text{отн}}$), изготовленных двумя методами. Из данных таблицы видно, что структурные параметры материалов (1) и (2), изготовленных разными методами, близки. Однородность материала (1), изготовленного ГП, значительно понизилась относительно ОКТ, в то время как однородность материала (2) при переходе на ГП почти сохранилась.

Определяющую роль в этом играет температура спекания: разница температур спекания по ОКТ и ГП материалов (1) и (2) составляет 70 К и 10 К, соответственно. Плотности обоих материалов, изготовленных ГП, близки к рентгеновским; изготовленных по ОКТ — близки к предельно достижимым при этой технологии [24].

Сравнение картин зеренного ландшафта СПМ — ПКР13, ПКР80, полученных по ОКТ и ГП (рис. 2), выявило принципиальную разницу в характере их зеренного строения: мелкозернистость и плотноупакованность кристаллитов в (1) (ПКР13) и формирование гигантских, хаотически размещённых и окаймлённых толстыми межкристаллитными прослойками зёрен в (2) (ПКР80).

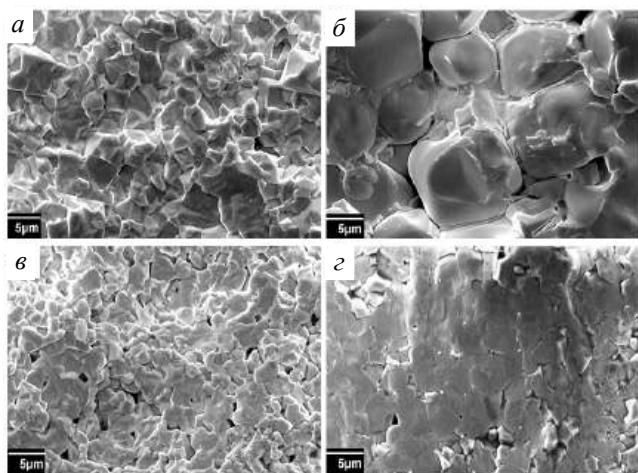


Рис. 2. Картинки зеренного ландшафта СПМ — ПКР13 (а, в) и ПКР80 (б, г), полученных по обычной керамической технологии (а, б) и горячим прессованием (в, г)

Причина наблюдаемого, несомненно, связана со спецификой качественно-количественного элементного состава каждого из материалов, обуславливающего в определённой мере их фазовые состояния и характер протекающих рекристаллизационных процессов. Так, присутствие в составе химических композиций и в (1), и в (2) заметного количества ионов марганца обуславливает их СЖ [25], то есть достаточно высокие значения δ [1] и, как следствие, формирование мелкозернистой

структуры в (1) и в других сегнетоактивных материалах этой группы [26]. Дополнительным фактором, сдерживающим рост зёрен в (1), является его более сложный, чем в (2), фазовый состав. Сосуществование в (1) двух Т-искажённых кристаллических структур с близкими параметрами элементарных ячеек (см. рис. 1, б) и варьируемым в процессе синтеза и спекания материала их количественным соотношением, на фоне которого протекают рекристаллизационные процессы, благоприятствует неоднородности состава композиции и связанной с ней возможности одновременного возникновения нескольких центров рекристаллизации с последующим ростом мелких зёрен. С межфазными взаимодействиями в процессе тепловой обработки исследуемых сред может быть связано и возникновение эффекта Хэдвалла — повышение реакционной [27] (в данном случае рекристаллизационной) активности в результате и/или в процессе таких взаимодействий, что также способствует одномоментному возникновению множества центров рекристаллизации, обеднённых композиционной массой, что генерирует формирование измельченного зеренного ландшафта. Заметим, что этот случай фазового расщепления ни в коей мере не адекватен таковому в морфотропной области (МО), где сосуществуют разнотипные структуры: с одной стороны, уже исчезающая, с другой, — только возникающая [2]. Это определяет минимум δ в МО и, как следствие, максимум \bar{D} в силу существующей обратной связи между этими характеристиками [28].

В ПКР80 формируется весьма крупнозернистая картина. Это, на взгляд авторов, является результатом присутствия в составе (2) кремния, образующего жидкие фазы (ЖФ) [29], в свою очередь, способствующие стремительному росту зёрен из-за облегчения массопереноса, поверхностной диффузии. Заметим также, что наличие в составе шихт материалов (наибольшее в ПКР80) оксидов марганца, провоцирующих при повышенных температурах появление низкоплавких эвтектик (из-за низких $T_{\text{пл}}$ этих оксидов), также способствует появлению ЖФ и, как следствие, ускоренному росту кристаллитов. Это подтверждается и резким снижением температуры спекания, $T_{\text{сп}}$, в (2) по сравнению с $T_{\text{сп}}$ в (1), что свидетельствует об изменении характера рекристаллизационных процессов: от твердофазного в (1) к процессу с участием ЖФ в (2) [30].

Как известно [31], макроотклики сегнетоактивных материалов, в том числе и анализируемых, зависят как от состояния кристаллической структуры, так и микроструктуры, что и демонстрирует табл. 2.

Таблица 2

Основные электрофизические характеристики сегнетожестких СПМ ПКР13 и ПКР80, полученных по обычной керамической технологии и методом горячего прессования

| Основные электрофизические характеристики | СПМ | | | |
|--|---------------------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------|
| | ПКР13 | | ПКР80 | |
| | Обычная керамическая технология | Горячее прессование | Обычная керамическая технология | Горячее прессование |
| Пьезохарактеристики: d_{ij} , пКл/Н / ($ d_{31} /d_{33}$); $ g_{31} $ мВ/мН; Q_m | 58/155; 7,3; 2010 | 65/-; 9,2; 2800 | 37/144; 6,1; 2440 | 51/-; 7,2; 4000 |
| Электрофизические характеристики: T_k , К/ $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ / $\lg \delta \cdot 10^2$ / K_p | 607/900/1,02/0,36 | 608/800/0,70/0,40 | 631/682/0,61/0,27 | 583/800/0,60/0,36 |
| Частотные характеристики: $\delta f_0/f_r$, % (100—375 К) / $\delta f_0/f_r$, % (215—375 К) | 0,9/0,37 | -/0,20—0,25 | 0,6/0,28 | -/0,25 |

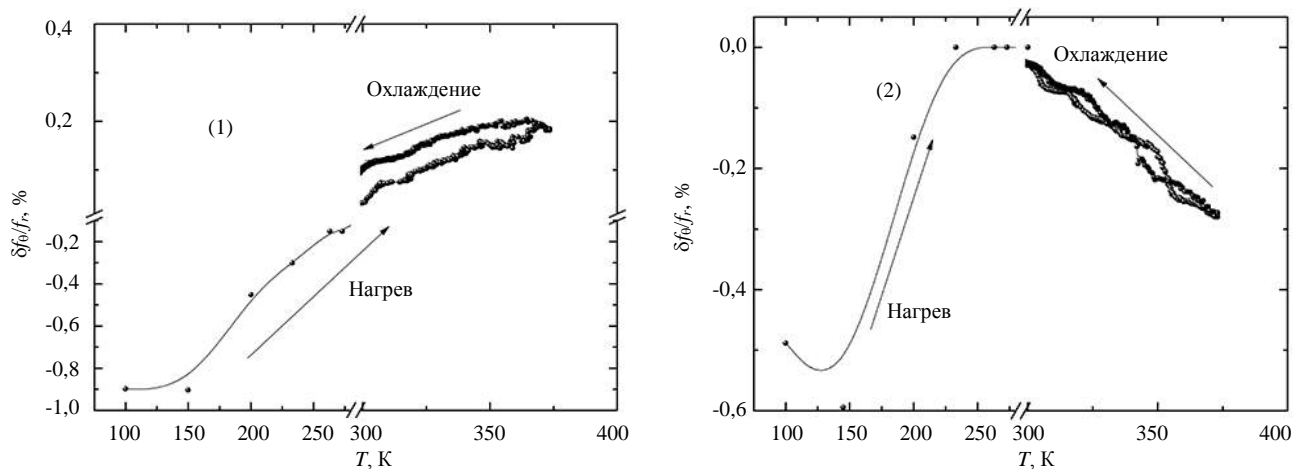
Так, в (1) с меньшей величиной δ реализуются более высокие значения $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$, K_p , d_{ij} . В (2) за счёт цементирующего действия ЖФ реализуются более низкие диэлектрические и механические потери, более высокая механическая добротность.

Как было сказано выше, частотно-селективные устройства являются важными элементами современных радиотехнических систем, поскольку их широко используют в системах связи, в фазированных антенных решётках радиолокационных станций, а также в различной измерительной и специальной радиоаппаратуре.

Принимая во внимание, что многие устройства могут быть выполнены из СПМ, насущной стано-

вится проблема стабилизации их свойств, из которых особо выделяется температурная стабильность резонансной частоты, $\delta f_0/f_r$, в рабочем интервале температур. На рис. 3 приведены зависимости $\delta f_0/f_r(T)$ полученных по ОКТ материалов (1) и (2) в диапазоне 100—375 К.

Анализ рис. 3 показывает, что изменение резонансной частоты (в рабочем диапазоне 215—375 К) составляет 0,28 % и 0,37 % для материалов (2) и (1), соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о том, что материалы (1) и (2), изготовленные по ОКТ, обладают высокой стабильностью $\delta f_0/f_r$ и не уступают материалам, изготовленным методом ГП по значениям $\delta f_0/f_r$ [3]

Рис. 3. Зависимости $\delta f_0/f_r(T)$ материалов ПКР13 (1) и ПКР80 (2), изготовленных по ОКТ

Выводы

Проведенные комплексные исследования двух сегнетопьезоэлектрических материалов для частотно-селективных устройств, изготовленных двухстадийным твердофазным синтезом с последующим спеканием по обычной керамической технологии и горячим прессованием, показали сопоставимость их электрофизических свойств, в том числе, стабильности резонансной частоты. Это позволяет рекомендовать изготовление подобных материалов, базируясь на традиционном методе, без использования дорогостоящего горячего прессования.

Заключение

Полученные результаты целесообразно использовать при разработке фильтровых материалов и устройств на их основе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности 2023 г.).

Проект № FENW-2023-0010/(ГЗ0110/23-11-ИФ).

ЛИТЕРАТУРА

- Фесенко Е. Г., Данцигер А. Я., Разумовская О. Н. Новые пьезокерамические материалы. — Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 1983. — 160 с.
- Данцигер А. Я., Разумовская О. Н., Резниченко Л. А. и др. Многокомпонентные системы сегнетоэлектрических сложных оксидов: физика, кристаллохимия, технология. Аспекты дизайна сегнетопьезоэлектрических материалов. — Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 2001. Т. 1. — 408 с., 2002. Т. 2. — 365 с.
- Данцигер А. Я., Разумовская О. Н., Резниченко Л. А. Высокоэффективные пьезокерамические материалы: справочник. — Ростов н/Д.: Изд-во АО "Книга", 1994. — 31 с.
- Михайлин Ю. А. Интеллектуальные материалы // Полимерные материалы. Изделие, оборудование, технологии. 2004. Т. 63. С. 6—8.
- Bokov A. A., Ye Z. G. Recent progress in relaxor ferroelectrics with perovskite structure // J. Mater. Sci. 2006. V. 41. P. 31—52.
- Butt Z., Rahman S. U., Pasha R. A., Mehmood S., Abbas S., Elahi H. Characterizing barium titanate piezoelectric material using the finite element method // Trans. Electr. Electron. Mater. 2017. V. 18. P. 163—168.
- Elahi H., Eugeni M., Gaudenzi P. et al. Piezoelectric thermo electromechanical energy harvester for reconnaissance satellite structure // Microsyst. Technol. 2019. V. 25. P. 665—672.
- Hong C. H., Kim H. P., Choi B. et al. Lead-free piezoceramics — Where to move on? // J. Mater. 2016. V. 2. P. 1—24.
- Kozielski L., Lisińska-Czekaj A., Czekaj Kozielski D., Graded L. PZT ceramics for piezoelectric transformers // Prog. Solid State Chem. 2007. V. 35. P. 521—530.
- Guo L., Lu Q. Potentials of piezoelectric and thermoelectric technologies for harvesting energy from pavements // Renew. Sustain. Energy Rev. 2017. V. 72. P. 761—773.
- Araújo E. B., Yukimitu K., Moraes J. C. S. et al. Monoclinic-tetragonal phase transition in $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ studied by infrared spectroscopy // J. Phys. Condens. Matter. 2002. V. 14. P. 5195—5199.
- Kong L. B., Zhang T. S., Ma J., Boey F. Progress in synthesis of ferroelectric ceramic materials via high-energy mechanochemical technique // Prog. Mater. Sci. 2008. V. 53. P. 207—322.
- Noheda B. Structure and high-piezoelectricity in lead oxide solid solutions // Curr. Opin. Solid State Mater. Sci. 2002. V. 6. P. 27—34.
- Verma A. S., Kumar D., Dubey A. K. A review of an innovative concept to increase the toughness of the ceramics by piezoelectric secondary phases // Ceram. Int. 2018. V. 44. P. 16119—16127.
- Михайлин Я. А. Интеллектуальные материалы // Ж. Полимерные материалы. 2005. Т. 1. С. 25—27.
- Гавриляченко С. В., Резниченко Л. А., Рыбняк А. Н., Гавриляченко В. Г. Пьезокерамика для частотно-селективных устройств — Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского государственного педагогического университета, 1999. — 240 с.
- Фесенко Е. Г. Семейство перовскита и сегнетоэлектричество. — М.: Атомиздат, 1972. — 248 с.
- IEEE Standard on Piezoelectricity ANSI/IEEE Std 176-1987, New-York. 1988. DOI: 10.1109/IEEESTD.1988.79638.
- Andryushin K. P., Andryushina I. N., Shilkina L. A. et al. Features of the structure and macro responses in hard ferro piezoceramics based on the PZT system // Ceramics International. 2018. V. 44(15). P. 18303—18310.
- Andryushina I. N., Reznichenko L. A., Shilkina L. A. et al. The PZT system ($\text{PbTi}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_3$, $0 \leq x \leq 1.0$): The real phase diagram of solid solutions (Room temperature). Part 2 // Ceramics International. 2013. V. 39(2). P. 1285—1292.
- Reznichenko L. A., Shilkina L. A., Razumovskaya O. N. et al. Phase formation in near-morphotropic region of the $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ system, structural defects, and electromechanical properties of the solid solutions // Phys. Solid State. 2009. V. 51. P. 1010—1018.
- Andryushina I. N., Reznichenko L. A., Alyoshin V. A. et al. The PZT system ($\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$, $0.0 \leq x \leq 1.0$): Specific features of recrystallization sintering and microstructures of solid solutions. Part 1 // Ceramics International. 2013. V. 39(1). P. 753—761.
- Reznichenko L. A., Shilkina L. A., Razumovskaya O. N. et al. Phase x-T diagram of actual solid solutions of the $(1-x)\text{PbZrO}_3$ - $x\text{PbTiO}_3$ system ($0.37 \leq x \leq 0.57$) // Physics of the Solid State. 2008. V. 50(8). P. 1527—1533.
- Okazaki K. Ceramic Engineering for Dielectrics. — Tokyo, 1969.
- Резниченко Л. А., Разумовская О. Н., Гавриляченко С. В. Роль марганца в "ужесточении" сегнетопьезоэлектрических материалов: сб. Фундаментальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения ("Пьезотехника-99"). — Ростов-на-Дону, 1999. С. 98—108.
- Сахненко В. П., Дергунова Н. В., Резниченко Л. А. Энергетическая кристаллохимия твердых растворов соединений кислородно-октаэдрического типа и моделирование пьезокерамических материалов. Сер. Фундаментальное материаловедение. — Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского государственного педагогического университета, 1999. — 321 с.
- Hedvall J. A., Heubergeranorg J. Z. Säureplatzwechsel in festen Phasen. I. Carbonate der Erdalkalien und Magnesiumcarbonat // Anorg. Allgem. Chem. 1922. V. 122. P. 181—187. <https://doi.org/10.1002/zaac.19221220118>.

28. Резниченко Л. А., Данцигер А. Я., Разумовская О. Н. et al. Особенности морфотропного фазового перехода в системе $(1-x)\text{NaNbO}_3-x\text{PbTiO}_3$: сб. трудов Междуна. науч.-практ. конф. "Фундаментальные проблемы современной пьезоэлектроники" ("Пьезотехника-95"). — Ростов-на-Дону, Азов. 1995. Т. 2. С. 13—32.

29. Будников П. П., Гинстлинг А. М. Реакции в смесях твёрдых веществ. — М.: Изд-во литературы по строительству. Изд. 3 испр. и дополн., 1971. — 488 с.

30. Резниченко Л. А., Разумовская О. Н., Шилкина Л. А., Алешин В. А. Жидкая фаза в ниобатах щелочных металлов: сб. материалов 7-го Международного семинара по физике сегнетоэлектриков-полупроводников. 24—27.09.1996 г. — Ростов-на-Дону: МП "Книга", 1996. № 6. С. 149—151.

31. Данцигер А. Я., Разумовская О. Н., Резниченко Л. А., Дудукина С. И. Высокоэффективные пьезокерамические материалы. Оптимизация поиска. — Ростов-на-Дону: Изд-во "Пайк", 1994. — 96 с.

Effect of the method of the manufacturing intelligent composite materials for frequency-selective devices on the formation of correlations "elemental composition — phase-grain structure — macro-responses"

^{1,2} K. P. ANDRYUSHIN, ¹ S. I. DUDKINA, ¹ L. A. SHILKINA, ³ A. V. NAGAENKO,

¹ I. N. ANDRYUSHINA, ^{2,4} S. V. KHASBULATOV, ¹ L. A. REZNICHENKO

¹ Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

² Integrated Research Institute named after H. I. Ibragimov RAS, Grozny, Russia

³ Institute of High Technologies and Piezotechnics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

⁴ Chechen State University named after A. A. Kadyrov, Grozny, Russia

Two ferroelectric materials for the frequency-selective devices were fabricated by two-stage solid-phase synthesis followed by sintering according to conventional ceramic technology and hot pressing, and a comprehensive study of their electrophysical properties was carried out. The comparability of the electrophysical parameters of these materials, including the stability of the resonant frequency during their manufacture by different methods, is shown. This allows us to recommend the traditional method of the manufacturing such materials, without the use of the expensive hot pressing.

Keywords: ferroelectric materials, technologies, resonant frequency stability.

УДК 621.71:669.018.44

DOI: 10.52190/2073-2562_2023_4_41

EDN: CMUDBA

Технологические особенности механической обработки сотового заполнителя и исследование их влияния на качество сотовой структуры

А. Е. КОВАНОВ; А. А. АРТЁМОВ; Н. В. СТЕПАНОВ, канд. техн. наук
АО «ОНИП "Технология" им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Калужская обл., Россия

Рассмотрены задачи механической обработки сотового заполнителя переменной строительной высоты из алюминиевой фольги с использованием различных способов фиксации заготовки. Описаны основные виды дефектов, встречающихся при обработке сот, и особенности режимов фрезерования сотового заполнителя, изготовленного из фольги разных толщин. Выявлены зависимости количества и вида дефекта от параметров режима механической обработки.

Ключевые слова: сотовый заполнитель, фиксация сотовой структуры для механической обработки, режимы механической обработки, дефекты сотовой структуры.

Расширение области применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в агрегатах авиационной и космической техники требует особого внимания к решению технологических задач, повышающих качество изделий и обеспечивающих стабильность их свойств. Учитывая, что доля применения ПКМ в конструкциях летательных аппаратов зачастую превышает 50 % [1], технологическое совершенствование их изготовления становится особенно актуальным.

Среди множества деталей и агрегатов из ПКМ следует выделить получившие широкое распространение трехслойные конструкции, состоящие из двух несущих слоев и расположенного между ними легкого заполнителя, наиболее ярким представителем которого является сотовый [2].

За счет разнесения жестких несущих слоев (воспринимающих растяжение, сжатие и сдвиг в плоскости листа) на расстояние, определяющееся толщиной сотового заполнителя, достигается большее отношение жесткости трехслойной конструкции к ее массе. Если сравнивать с монолитной конструкцией из ПКМ, то весовая эффективность трехслойной в 3 и более раз выше [2].

Сотовый заполнитель — самый перспективный на сегодняшний день материал для изготовления

сверхлегких и прочных конструкций различного назначения. Существует много разновидностей заполнителя, отличающихся по форме ячейки, материалу и технологии производства. В данной работе в качестве заполнителя для трехслойных конструкций из ПКМ рассмотрен сотовый заполнитель из алюминиевой фольги с шестигранной ячейкой, изготавливаемый склеиванием листов фольги и последующей растяжкой в сотовую структуру. На рис. 1 представлен фрагмент трехслойной панели с сотовым заполнителем с шестигранной ячейкой [2].

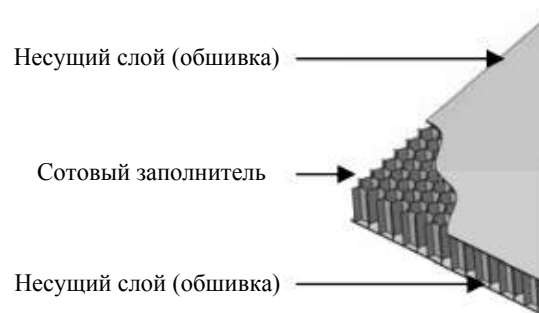


Рис. 1. Фрагмент трехслойной панели

Основными параметрами, определяющими прочностные и жесткостные свойства сотового заполнителя, являются размер грани и толщина стенок ячейки [3]. При этом следует отметить, что возникновение дефектов, искажающих форму граней сотового заполнителя, снижает характеристики сотового заполнителя и трехслойной конструкции в целом.

В данной работе представлены исследования влияния технологических особенностей механической обработки на количество и виды дефектов в сотовой структуре.

Кованов Антон Евгеньевич, начальник сектора 432 лаборатории 43.

E-mail: akovanov@mail.ru

Артёмов Алексей Александрович, инженер-технолог сектора 432 лаборатории 43.

E-mail: alex-obn-2005@mail.ru

Степанов Николай Викторович, начальник лаборатории 42.

E-mail: stepnv@obninsk.ru

Статья поступила в редакцию 30 августа 2023 г.

© Кованов А. Е., Артёмов А. А., Степанов Н. В., 2023

Способы фиксации заготовки сотового заполнителя для механической обработки

Как правило, сотовую структуру в растянутом виде подвергают механической обработке при необходимости получения сотового заполнителя переменной толщины (рис. 2).

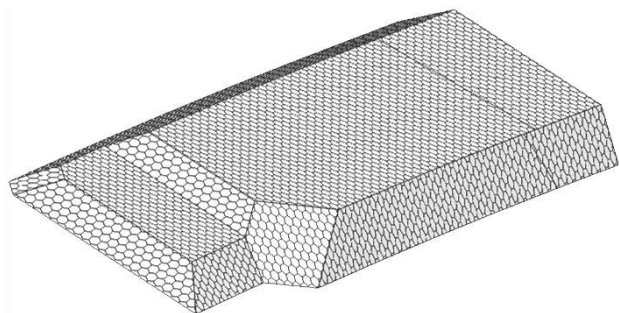


Рис. 2. Сотовая структура переменной толщины

При этом от того, насколько прочным окажется фиксация, зависит точность исполнения геометрии сотового заполнителя и трехслойной детали, где он применяется. Представлен анализ используемых методов фиксации сотовой структуры на станке с ЧПУ.

Фиксация заготовки сотового заполнителя с помощью вакуумного приспособления

Данный способ предполагает приклеивку к одной стороне сотового блока плотного материала, не пропускающего воздух. В качестве материала может выступать бумага, гермоткань, плёнки с липким покрытием. Заготовку сотового блока устанавливают стороной с приклеенным материалом на специальное вакуумное приспособление (рис. 3), через отверстия которого за счет откачивания воздуха производят прижатие приклеенного материала к вакуумному приспособлению.

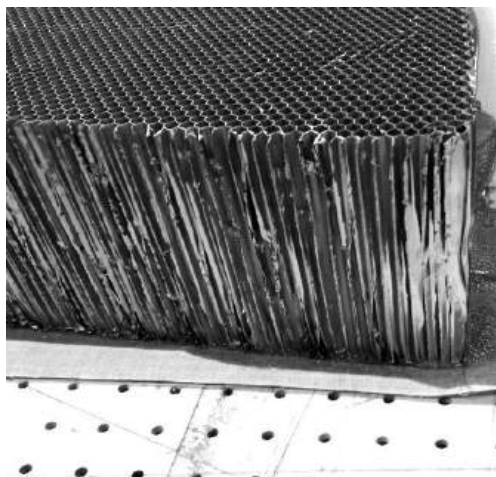


Рис. 3. Сотовый блок с приклеенным материалом на поверхности вакуумного стола

Преимущества данного способа:

- короткий производственный цикл механической обработки (за счёт мгновенной фиксации заготовки на вакуумном приспособлении при включении вакуумного насоса).

Недостатки данного способа:

- невысокая надёжность фиксации заготовки и, как следствие, ограничение применимости данного метода в зависимости от геометрии детали (большая кривизна, малые углы скосов);
- необходимость снятия приклеенного материала после обработки, при этом дополнительно возникает проблема удаления остатков клея и очистки поверхности сотового блока.

Фиксация заготовки сотового заполнителя с помощью использования фиксаторов с низкой температурой плавления

Существует способ фиксации заготовки сотового заполнителя при его механической обработке путём заливки ячеек расплавленным фиксатором (ксилит, сорбид, полиэтиленгликоль) с его последующим отверждением [4, 5]. Данный способ обладает рядом существенных недостатков, а именно, время застывания фиксатора может достигать 3—6 ч (существенное увеличение производственного цикла), а также важным фактором становится необходимость удаления остатков фиксатора после обработки сотового блока. Особенно это имеет значение для деталей, к которым предъявляют повышенные требования в отношении чистоты поверхностей фольги сотового заполнителя.

Фиксация заготовки сотового заполнителя с помощью замораживания воды в ячейках сотовой структуры

Для исключения загрязнения сотовой структуры продуктами расплавов целесообразно в качестве фиксатора использовать воду, замораживая её на специальном приспособлении [6]. Замораживающая установка представляет собой ёмкость с бортами, установленную на станок с ЧПУ. Ёмкость имеет каналы с теплоносителем. Перед началом обработки ёмкость заливают водой, заготовку сотового блока помещают в воду полностью и на неё устанавливают грузы для равномерного контакта нижней поверхности сотового блока с плоской поверхностью дна ёмкости. Канал с теплоносителем охлаждают до температуры -18°C и поддерживают при данной температуре в течение всего времени обработки с помощью специального холодильного оборудования. После полного промерзания сотового блока осуществляется его механическая обработка на станке с ЧПУ. После обработки сотового блока

производят его оттаивание с помощью тэнов, встроенных в конструкцию емкости, либо путём проливки сотоблока горячей водой.

Преимущества данного способа:

- высокая надёжность фиксации заготовки (позволяет обработать сотоблок произвольной геометрии без сдвигов и отрыва заготовки, и, следовательно, без потери точности);
- высокое качество обработки (отсутствие надрывов, замятий и заусенцев);
- возможность применения стандартного режущего инструмента по алюминию любых диаметров.

Недостатки данного способа:

- длительный производственный цикл механической обработки (для фиксации заготовки необходимо время на промерзание водного слоя на всю глубину, скорость промерзания составляет около 10 мм/ч).

Фиксация заготовки сотового заполнителя с помощью замораживания воды в нижней части сотовой структуры

Для снижения длительности производственного цикла механической обработки сотового заполнителя в особенности больших строительных высот (более 20 мм) на сотовых заполнителях, изготовленных из фольги повышенной толщины (более 50 мкм) было предложено выполнять заливку воды и заморозку не на всю толщину заготовки, а на 4—6 мм. При этом верхняя часть сотоблока остаётся свободной от льда. Опыты показали, что надёжность такой фиксации не уступает полной заморозке сотовой структуры.

Преимущества данного способа:

- высокая надёжность фиксации заготовки (позволяет обработать сотоблок произвольной геометрии без сдвигов и отрыва заготовки, и, следовательно, без потери точности);

- снижение длительности производственного цикла.

Недостатки данного способа:

- невозможность использования на сотовых структурах, изготовленных из тонкой фольги (толщина менее 50 мкм).

Исследования влияния режимов механической обработки на качество сотовой структуры

Исследования показали, что для увеличения производительности механической обработки для сотового заполнителя с толщиной фольги 60 мкм и более следует использовать специальные фрезы роутерного типа вместо ножевых фрез и стандартного режущего инструмента по алюминию. При этом фиксацию заготовки сотового заполнителя осуществлять заморозкой воды только в нижней части сотовой структуры, что существенно сокращает длительность производственного цикла. В данном случае съём материала можно производить сразу на всю необходимую глубину, ограничиваясь только длиной режущей части фрезы, тогда как ножевой фрезой возможно снимать послойно не более 4—6 мм в глубину за проход, а в некоторых случаях (при обработке замкнутых карманов) не более 1—2 мм за проход. Также дополнительные ограничения накладываются и на режимы обработки данными фрезами для получения необходимого качества обрабатываемых поверхностей.

При анализе качества получаемой при механической обработке поверхности сотового заполнителя учитывают виды дефектов, указанные на рис. 4.

При механической обработке использовали фрезу роутерного типа Garant 209480 Ø16 мм, была выбрана оптимальная подача, обороты варьировались в диапазоне от 10 до 20 тыс. об/мин в целях определения оптимальных значений по качеству обработки. Отработку режимов производили на сотах с толщиной фольги 60 и 80 мкм (размер грани ячейки — 1,8 мм).

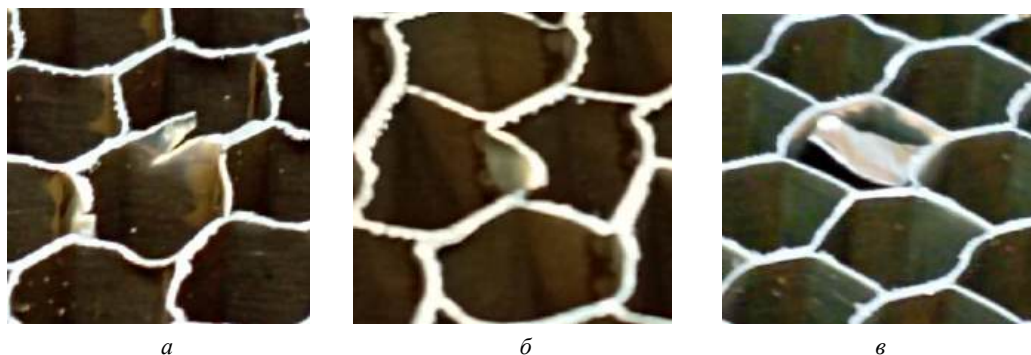


Рис. 4. Дефекты стенки ячейки:
а — надрыв, б — замятие, в — заусенец

На рис. 5—7 приведены данные по количеству дефектов на площади обработанной поверхности сот (0,01 м²) в зависимости от режимов обработки для сот из фольги толщиной 60 и на рис. 8—10 — толщиной 80 мкм с учетом хода обрабатывающего инструмента относительно сотовой структуры:

А — попутная фрезеровка вдоль направления жесткости;

Б — встречная фрезеровка вдоль направления жесткости;

В — попутная фрезеровка перпендикулярно направлению жесткости;

Г — встречная фрезеровка перпендикулярно направлению жесткости.

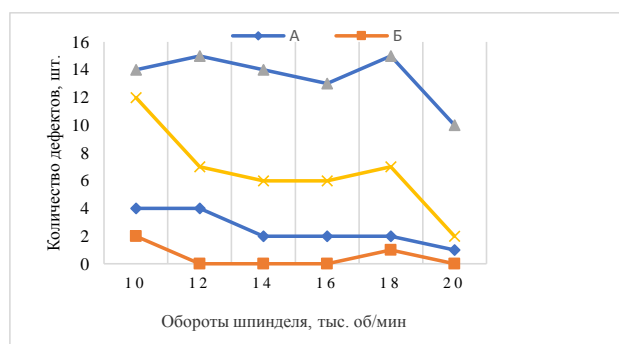


Рис. 5. Зависимость количества надрывов от скорости вращения шпинделя

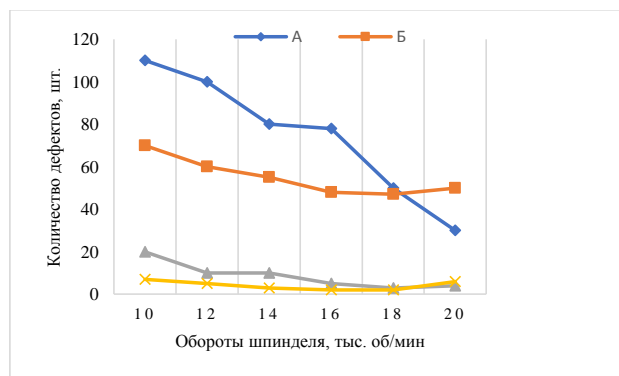


Рис. 6. Зависимость количества замятий от скорости вращения шпинделя

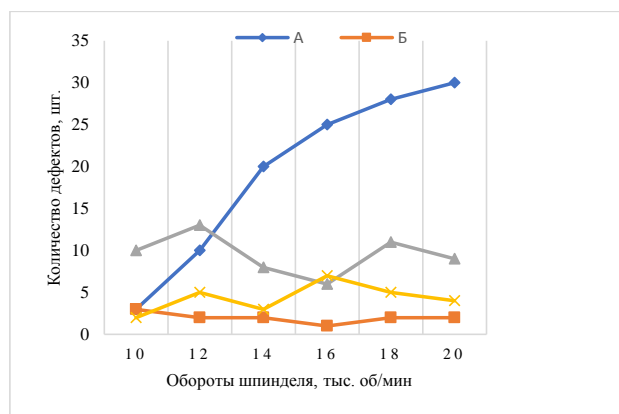


Рис. 7. Зависимость количества заусенцев от скорости вращения шпинделя

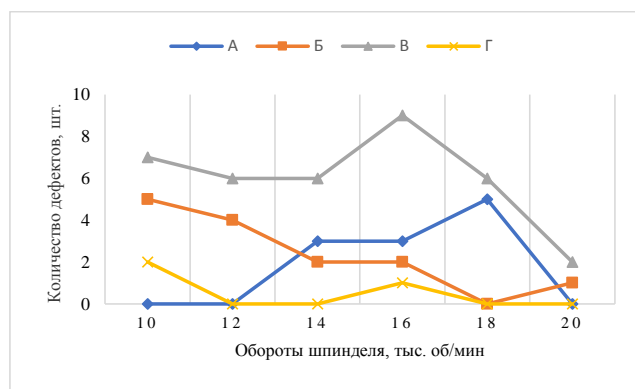


Рис. 8. Зависимость количества надрывов от скорости вращения шпинделя

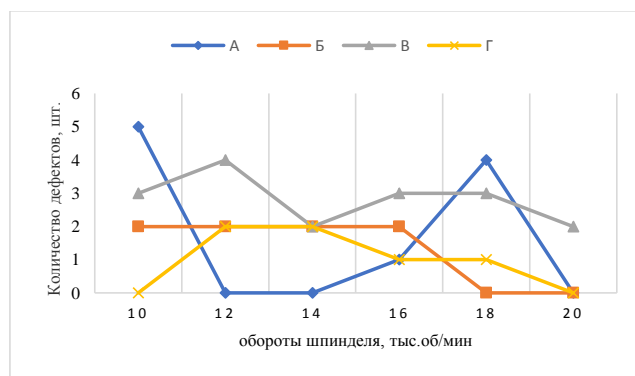


Рис. 9. Зависимость количества замятий от скорости вращения шпинделя

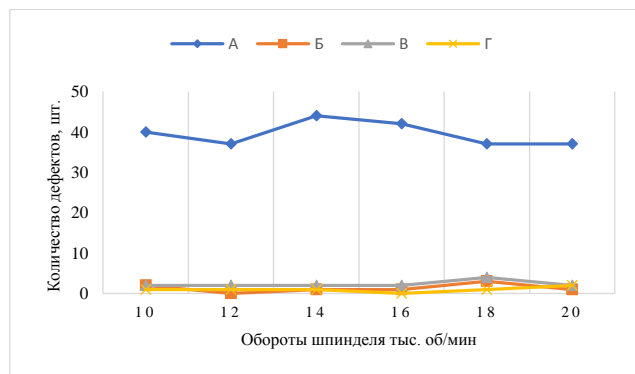


Рис. 10. Зависимость количества заусенцев от скорости вращения шпинделя

Анализ полученных зависимостей показывает, что для получения наилучшего качества механической обработки сотового заполнителя по совокупности всех видов дефектов фрезами роутерного типа с применением метода фиксации заготовки сотового заполнителя заморозкой воды в нижней части сотовой структуры рекомендуется придерживаться следующих режимов:

- направление движения режущего инструмента должно выбираться преимущественно вдоль направления жесткости сотового заполнителя с применением встречного фрезерования;
- скорость вращения шпинделя следует выбирать в диапазоне 14000—20000 об/мин.

Выводы

Проведен анализ способов фиксации сотовой структуры для механической обработки сотового заполнителя переменной строительной высоты. Выявлены преимущества и недостатки способов фиксации, позволяющие выбрать подходящий способ для конкретной структуры сотового заполнителя.

Предложен способ фиксации сотовой структуры повышенной жесткости (размер грани ячейки 1,8 мм, толщина фольги 60 и 80 мкм), обеспечивающий уменьшение периода производственного цикла при обеспечении заданного качества механической обработки сотового заполнителя.

Показаны основные виды дефектов сотовой структуры, возникающие в процессе механической обработки сотового заполнителя.

Представлены зависимости количества дефектов от особенностей режима механической обработки (скорости вращения шпинделя и направления прохода инструмента), даны рекомендации по механической обработке сотового заполнителя, позволяющие минимизировать количество дефектов при обработке сотового заполнителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вешкин Е. А., Сатдинов Е. А., Постнов В. И., Стрельников С. В. Оценка влияния длительности и условий хранения на свойства препрега и ПКМ на его основе // Труды ВИАМ. 2017. № 8(56). С. 90—98.
2. Тестоедов Н. А., Наговицин В. Н., Пермяков М. Ю. Применение трехслойных сотовых конструкций в космических аппаратах // Вестник СибГАУ. 2017. Т. 17. № 1. С. 200—211.
3. Гиясов Б. И., Серёгин Н. Г., Серёгин Д. Н. Трёхслойные панели из полимерных композиционных материалов: учеб. пособие. — М: Издательство АСВ, 2015. — 64 с.
4. Заманская Р. И., Каржавина Т. В., Ошер Р. Н., Павловская Р. Д. Способ обработки сотовых заполнителей. Авторское свидетельство SU 131209 A1 кл. 49/12. Опубл. 1960.10.10.
5. Патраев Е. В., Чучурин В. Е., Наговицин А. В., Репин Д. А. Технология механической обработки сотового заполнителя в растянутом виде: мат. XVII Междун. науч. конф., посвящённой памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнёва "Решетнёвские чтения". — Красноярск, 2013. С. 330.
6. Берсудский В. Е., Крысин В. Н., Лесных С. И. Технология изготовления сотовых авиационных конструкций. — М.: Машиностроение, 1975. — 296 с.

Technological features of the mechanical processing of honeycomb and the study of their influence on the quality of the honeycomb structure

A. E. KOVANOV, A. A. ARTEMOV, N. V. STEPANOV
ORPE Technologiya named after A. G. Romashin, Obninsk, Kaluga Region, Russia

The problems of mechanical processing of a honeycomb of variable height from aluminum foil using various methods of fixing the workpiece are considered. The main types of defects encountered in the processing of honeycombs and the features of the modes of milling a honeycomb made of foil of different thicknesses are presented. The dependences of the number and types of defects on the parameters of the machining mode are revealed.

Keywords: honeycomb filler, honeycomb structure fixation for machining, machining modes, honeycomb structure defects.

Влияние физико-химического состояния пентаоксида ниобия на свойства композиционных ниобатных материалов (Обзор)

С. И. ДУДКИНА; К. П. АНДРЮШИН, канд. физ.-мат. наук; Л. А. ШИЛКИНА;
И. Н. АНДРЮШИНА, канд. физ.-мат. наук; И. А. ВЕРБЕНКО, д-р физ.-мат. наук;
Л. А. РЕЗНИЧЕКО, д-р физ.-мат. наук

Научно-исследовательский институт физики, Южный федеральный университет,
г. Ростов-на-Дону, Россия

Представлен обзор публикаций, посвященных изучению зависимости свойств ниобатных материалов от состояния используемого Nb_2O_5 . Рентгенографически показано существование модулированных структур в монооксиде Nb_2O_5 , а также в бинарных и тройных Nb-содержащих керамиках соединений $NaNbO_3$, $LiNbO_3$ и др. Установлена зависимость параметров возникающих структур от термодинамической предыстории объектов. Определены требования, предъявляемые к Nb_2O_5 , обеспечивающие оптимальность свойств ниобатных материалов.

Ключевые слова: бессвинцовые композиции, пентаоксид ниобия, кристаллографический сдвиг, термодинамическая предыстория.

Одним из актуальных трендов современного материаловедения является направление, связанное с экологизацией элементной базы устройств электронной техники. Переход в настоящее время к экологически чистой продукции, обусловленный формированием новых Европейских законодательных инициатив [1, 2], запрещающих использование свинца — основного компонента большинства функциональных композиционных материалов пьезотехнической направленности [3—6],

обусловил в 2000-е гг. "взрыв" идей в области создания бессвинцовых композиций (рис. 1).

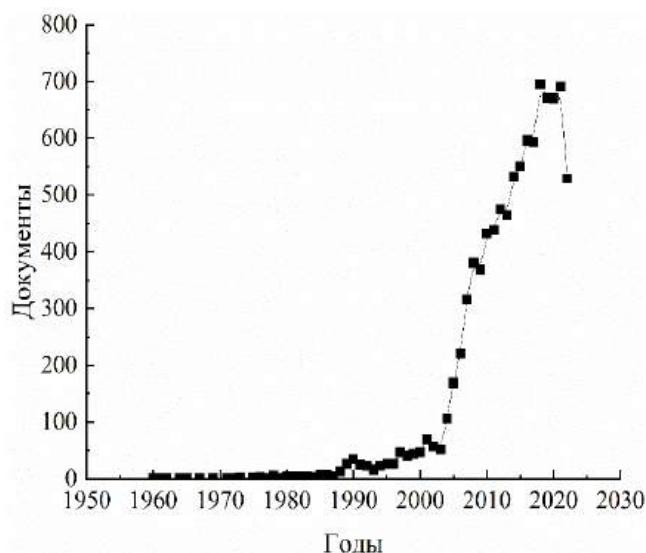


Рис. 1. Публикационная активность в области разработки и исследования бессвинцовых сегнетоактивных материалов в период с 1954 по 2022 гг.

Свинец относится к числу чрезвычайно токсичных элементов и возглавляет перечень приоритетных особо вредных веществ 1-го класса опасности. Его антропогенная эмиссия превысила природную, а технофильность составила $2 \cdot 10^9$.

Дудкина Светлана Ивановна, старший научный сотрудник отдела "Интеллектуальные материалы и нанотехнологии".

E-mail: s.i.dudkina@yandex.ru

Андрюшин Константин Петрович, ведущий научный сотрудник отдела "Интеллектуальные материалы и нанотехнологии".

E-mail: vortexblow@gmail.com

Шилкина Лидия Александровна, старший научный сотрудник.

E-mail: lid-shilkina@yandex.ru

Андрюшина Инна Николаевна, старший научный сотрудник отдела "Интеллектуальные материалы и нанотехнологии".

E-mail: futur6@mail.ru

Вербенко Илья Александрович, директор.

E-mail: ilich001@yandex.ru

Резниченко Лариса Андреевна, заведующая отделом "Интеллектуальные материалы и нанотехнологии", профессор.

E-mail: lareznichenko@sfedu.ru

Статья поступила в редакцию 5 июня 2023 г.

© Дудкина С. И., Андрюшин К. П., Шилкина Л. А.,
Андрюшина И. Н., Вербенко И. А., Резниченко Л. А., 2023

Соединения свинца относятся к ядам с кумулятивным действием, накопление которых в организме оказывает отравляющее действие на человека, приводя к поражению практически всех жизненно важных органов: центральной и периферической нервной системы, крови, кожи и т. д. В связи с этим актуальным становится исключение агрессивных элементов из состава химических композиций материалов.

Южный федеральный университет не остался в стороне, занимая первое место среди научных организаций и групп РФ в области разработки и создания экологически чистых основ сегнетоактивных сред (рис. 2). Лидирующее положение среди них занимают материалы на основе ниобатов щелочных (НЩ) и щелочноземельных (НЩЗ) металлов [7, 8].

До 1998 г. ведущие зарубежные фирмы, производящие керамику (США — PCB Piezotronics INC, Endevco, Physical acoustic corporation, U.S. Philips Corporation, Department of Science@Technology, Linden Labor.; Швейцария — Kistler, Vibrometer; Дания — Bruel@Kjer; Великобритания — AVL; Япония — NTK, Tokin, Nippon Soken, Inc., Toyota Jidosha Kabushiki Kaisha, TDK Corporation; Корея — Korea Institute of Machinery@Materials, Dongil Technology Co. Ltd.), несвинцовосодержащую керамику не выпускали. В последние годы начали разворачиваться и активно поддерживаться исследования несвинцовосодержащих сегнетоэлектрических систем в ряде европейских стран (проект "Leed-free piezoelectric ceramics based on alkanin niobate family" — European research project Wethin the Graft programme, ведущими исполнителями которого являются Ferroperm Denmark, Jozef Stefan Institute, Slovenia, CSTI Spain, GI ultrasons France; проект "New Piezoelectric ceramic swith $T_k > 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ for operation up to $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ " —

Brite/Enram. project; проект "Structure — property relations in $\text{LiNbO}_3\text{—NaNbO}_3$ (KNbO_3) Solid Soluti-os", The University of Sheffield, United Kingdom), во многом инициированные российскими работами, опубликованными в международных журналах, в том числе в трудах практически всех Международных конференций по проблеме получения и исследования сегнетоэлектриков, начиная с 1974 г. Тем не менее, на мировом рынке несвинцовосодержащая пьезотехническая продукция малочисленна. В связи с этим разрабатываемые авторами бессвинцовые экологически чистые пьезоматериалы способны увеличить наукоемкий экспортный потенциал. Необходимо также отметить, что экологическая сторона пьезотехнологий приобрела для отечественных исследователей и важное экономико-политическое значение. При вынужденной значительной потере интереса к подобным высокотехнологическим разработкам со стороны отечественных потребителей наблюдается целенаправленное ограничение участия российских ученых в международных программах по данному направлению со стороны зарубежных фондов, что приводит к сокращению числа источников финансирования и, следовательно, может привести к потере конкурентоспособности отечественной пьезотехнической продукции, не только находящейся на мировом уровне, но, зачастую, превосходящей его.

Основным реагентом для получения таких материалов является пентаоксид ниобия, Nb_2O_5 . А поскольку он — наиболее термически устойчивый реагент из участвующих в синтезе ниобатной сегнетокерамики [9], "покрываемый" продуктами реакций [10], а также содержащийся в шихтах в значительных количествах (по объему он занимает $\sim 2/3$ от общего объема материала), то совершенно очевидно, что существенную роль в формировании структуры и свойств таких материалов будет

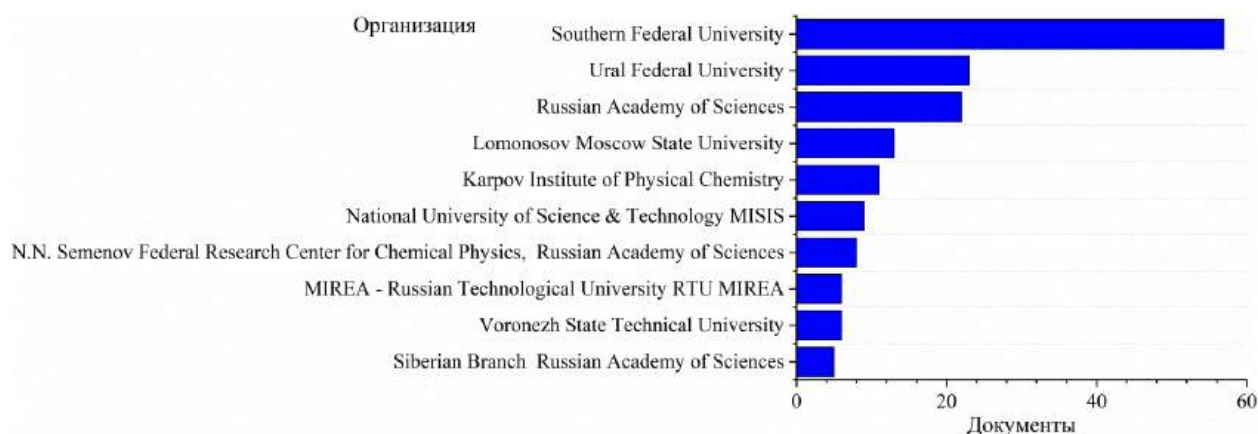


Рис. 2. Документы по организациям в Российской Федерации в области разработки и исследования бессвинцовых сегнетоактивных материалов за период с 1987 по 2022 гг.

играть физико-химическое состояние этого монооксида (дефектное, полиморфное, гранулометрическое, катионное, реологическое) [11—15]. Учитывая, что действующими Стандартами на Nb_2O_5 различных квалификаций [16] не предусматриваются регламенты на практически все из названных характеристик (кроме примесных), определяющих состояние Nb_2O_5 , что является одной из причин невоспроизводимости параметров ниобатных материалов, представляется целесообразным установление зависимости свойств ниобатных материалов от состояния используемого Nb_2O_5 и на этой основе определение требований, предъявляемых к Nb_2O_5 , обеспечивающих оптимальность их свойств.

Экспериментальные результаты, обсуждение

Nb_2O_5 относится к соединениям, для которых характерна блочная структура [17]: точечные дефекты (анионные вакансии), присущие Nb_2O_5 из-за переменной валентности Nb, исключаются путем кристаллографических сдвигов (КС) в двух почти ортогональных направлениях. Границами блоков ненарушенной структуры являются протяженные дефекты — плоскости кристаллографического сдвига (ПКС), которые можно рассматривать как трансляционные модуляции исходной структуры [17]. Формирование последних осуществляется путем перегруппировки связей между координационными полиэдрами. В таких структурах возможны двух- и трехмерные КС, следствием которых является разбиение кристалла на прямоугольные колонки размером $m \cdot n \cdot \infty$, (где m, n — число элементарных структурообразующих октаэдров NbO_6) или блоки размером $m \cdot n \cdot p$. Образование таких структур сдвига расширяет возможности получения упорядоченных фаз с близким атомным соотношением компонентов, и, соответственно, с очень малым различием термодинамических свойств. В семействе перовскита обнаружены (высокоразрешающим методом трансмиссионной электронной микроскопии) ПКС в монокристаллах PbTiO_3 , PbZrO_3 , $\text{Pb}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$; La; BaTiO₃ [18], при этом в первых трех их возникновение связывается с повышенной при $T > 970$ К летучестью оксида свинца.

В работе [19] опубликованы впервые полученные прямые рентгенографические доказательства существования таких модулированных структур в монооксиде Nb_2O_5 , а также в бинарных и тройных Nb-содержащих керамиках соединений NaNbO_3 , LiNbO_3 , $\text{PbNb}_{2/3}\text{Mg}_{1/3}\text{O}_3$, $\text{PbNb}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}\text{O}_3$ и др. и их твердых растворах (ТР). Показано, что причинами модуляции структуры являются КС, склонность к которым характерна для веществ кислородно-

октаэдрического типа, содержащих катионы с переменной валентностью. Описанные структурные нарушения сказываются на рассеянии рентгеновских лучей и приводят к появлению рядом с основными дифракционными максимумами сателлитных (рис. 3).

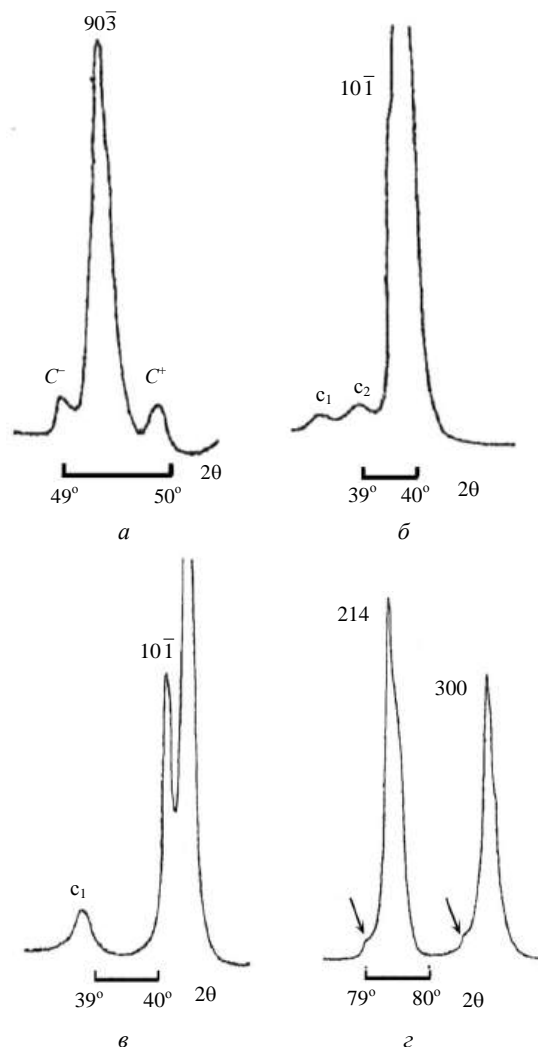


Рис. 3. Фрагменты рентгенограмм с сателлитами: $\alpha\text{-Nb}_2\text{O}_5$ (а), NaNbO_3 (б), $\text{Na}_{0,98}\text{Li}_{0,02}\text{NbO}_3$ (в), LiNbO_3 (г)

В ниобате натрия (НН) присутствие двух типов ПКС подтверждено наличием двух сателлитных диффузных максимумов, соответствующих двум различным волнам статических смещений атомов, каждая из которых вызвана своим типом ПКС. При этом появление сателлитов только с одной стороны относительно нормального отражения связано с корреляцией беспорядков расположения, замещения и смещения. Блочное строение ННЦМ должно обуславливать появление тетраэдрических вакантных позиций в местах стыков блоков. Существование таких позиций в исследуемых объектах доказано авторами на примере изучения электронного строения ТР $(\text{Na}_{1-x}\text{Pb}_x)(\text{Nb}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ ($x = 0,1$) (доказано существование Ti в тетраэдрических позициях) [19].

Установлена зависимость параметров возникающих структур от термодинамической предистории объектов [19]. Так, длины волн (периоды) модуляции λ для различных партий и квалификаций $\alpha_{\text{ВГ}}\text{—Nb}_2\text{O}_5$, рассчитанные по положению спателлитов C^- и C^+ , уменьшаются по мере загрязнения Nb_2O_5 примесями при переходе от квалификации особо чистой (осч) к технической ($\text{NbO}\text{—Pt}$), а внутри технических партий — к той, которая содержит наибольшее количество анионных включений. В NaNbO_3 расстояния между различными ПКС меняются в зависимости от способа его получения (обычная керамическая технология (ОКТ) или горячее прессование (ГП)). В ниобате лития (НЛ), синтезированном при разных температурах, отмечено резкое уменьшение λ в интервале 1070—1120 К, свидетельствующее об увеличении количества ПКС и, вероятно, их большем упорядочении. Такое "связывание" упорядоченных дефектов значительно уменьшает их подвижность, что проявляется в уменьшении скорости уплотнения и повышении температуры спекания ($T_{\text{сп}}$) НЛ. В системе $(\text{Na,Pb})(\text{Nb,Ti})\text{O}_3$ синтезированный ТР с $x = 0,165$ имеет расстояние между ПКС в направлении $[100] \sim 240 \text{ \AA}$, спеченный по ОКТ $\sim 200 \text{ \AA}$, спеченный методом ГП при $P = 200 \text{ кг/см}^2 \sim 180 \text{ \AA}$, при $P = 400 \text{ кг/см}^2 \sim 150 \text{ \AA}$. В системе $(\text{Na,Li})\text{NbO}_3$ в зависимости от состава λ изменяется от 55 до 75 \AA (что равно $\sim 10,5\text{—}13,5$ элементарным ячейкам), в то время как размер областей когерентного рассеяния (D) изменяется от 140 \AA до 250 \AA (т. е. $D = 2\lambda \dots 4\lambda$), только в НЛ $\lambda = D \approx 360 \text{ \AA}$.

При термической обработке Nb_2O_5 в интервале температур 1390—1440 К (в зависимости от партии монооксида) происходит переход из многофазного ($\alpha_{\text{ВГ}}+\eta$) в однофазное ($\alpha_{\text{ВГ}}$) состояние [13]. Это сопровождается изменением фазовых равновесий (μ) в ТР $(\text{Na,Li})\text{NbO}_3$, полученных из обожженных проб Nb_2O_5 . При этом совершенствуется структура таких ТР (уменьшается ширина рентгеновских линий b_{222} , снижаются микродеформации ($\Delta d/d_{222}$) и увеличивается средний размер кристаллитов, \bar{D} , керамик). Максимальные \bar{D} вблизи температуры перехода Nb_2O_5 в однофазное состояние ($T_{\text{ТО}}$) по аналогии с эффектом Хедвалла (повышенной реакционной способностью твердых тел во время или в результате полиморфных превращений) обусловлены интенсификацией диффузионных процессов. Последняя инициирована высокой подвижностью составных частей решетки при ее перестройке. В пользу разумности такой интерпретации свидетельствуют и минимальные при $T_{\text{ТО}}$ значения температуры начала интенсивного уплотнения синтезированных порошков и температуры спекания $T_{\text{сп}}$ ТР.

Поведение структурных и микроструктурных характеристик определяет и немонотонные изменения электрофизических параметров с экстремумами в окрестности температуры полиморфного превращения в Nb_2O_5 . Это напоминает соответствующий ход параметров вблизи морфотропного фазового перехода [20] с единственной разницей, что отклик керамики на структурную перестройку реализовался в третьем "поколении", поскольку ФП имел место в исходном реагенте (рис. 4).

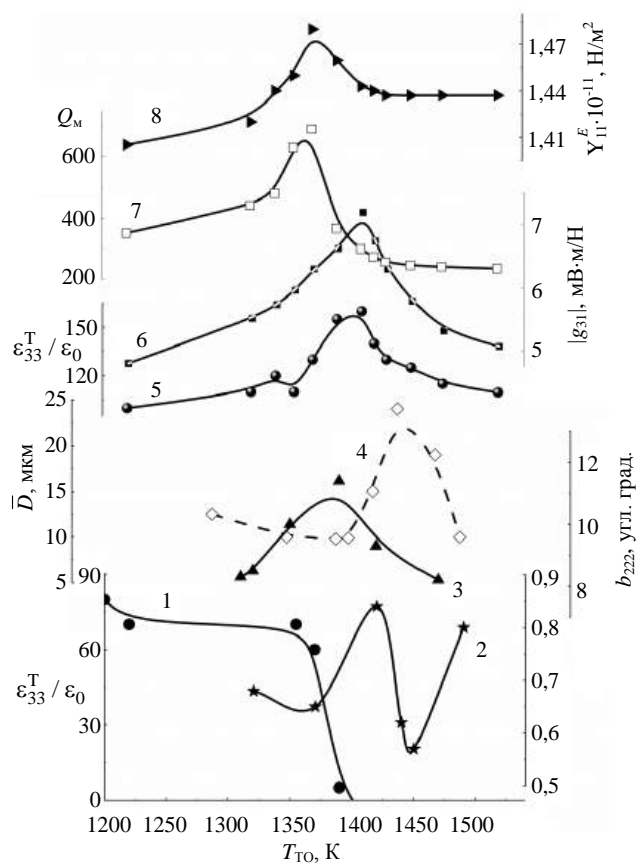


Рис. 4. Зависимости содержания фазы η характеристик ТР от температуры термообработки Nb_2O_5 :

1 — Nb_2O_5 ; структурных 2 — b_{222} , 3 — $\Delta d/d_{222}$; микроструктурных 4 — \bar{D} ; электрофизических 5 — $\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$; 6 — $|g_{31}|$, 7 — Q_m , 8 — Y_{11}^E

Немонотонная зависимость структурных (однородный параметр деформации, δ , и η — параметр, характеризующий степень доменных переориентаций, отличных от 180° -х), микроструктурных (\bar{D}), электрофизических (относительная диэлектрическая проницаемость поляризованных образцов, $\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$, коэффициент электромеханической связи радиальной моды колебаний образцов, K_r , пьезомодуль, $|d_{31}|$, скорость звука, V_1^E) и механических свойств ниобатной сегнетокерамики (НСК) наблюдается от гранулометрического состава исходного Nb_2O_5 . Показано, что экстремаль-

ными характеристиками обладают ТР, полученные при определенных значениях удельной поверхности частиц ($S_{уд}$) из интервала ($\Delta S_{уд.опт.}$) Nb_2O_5 различных квалификаций: (550—650) m^2/kg (для Nb_2O_5 (I) "Н60-ПГ"), (950—1000) m^2/kg (для Nb_2O_5 (II) "осч"), (2500—3500) m^2/kg (для Nb_2O_5 (III) типа осч) [14, 21—23].

Это связано с немонотонными изменениями скорости образования продуктов реакции (v_p), покрывающих Nb_2O_5 при его измельчении. Последнее, с одной стороны, приводит к увеличению $S_{уд}$ и, как следствие, усилению диффузионных процессов, с другой — торможению реакции на индивидуальных малых частицах, что, в результате, формирует максимум v_p внутри $\Delta S_{уд.опт.}$. Интенсивный массоперенос способствует и активной рекристаллизации, в связи с чем в окрестности или внутри $\Delta S_{уд.опт.}$ отмечается рост зерен (\bar{D}) керамики. Укрупнение \bar{D} , в свою очередь, благоприятствует увеличению суммарной площади доменных границ и их повышенной подвижности, подтверждаемых минимумом однородного параметра деформации δ [24] и максимумом величины η , характеризующей степень доменных переориентаций, отличных от 180° -х [25], совершенных в процессе поляризации керамики, внутри $\Delta S_{уд.опт.}$. Сам рост зерен в данном случае не разупрочняет керамику, так как \bar{D}_{\max} не достигает тех критических значений, при которых в НСК наблюдаются деструкционные явления. Более того, совершенная микроструктура ТР из $\Delta S_{уд.опт.}$, способствуя спайности и когерентности межкристаллитных границ, препятствует растрескиванию образцов. Различные значения $\Delta S_{уд.опт.}$ Nb_2O_5 разных квалификаций связаны с разной реакционной способностью смесей, определяемой примесным составом — одним из эффективных факторов изменения поверхностной активности твердых тел. По мере уменьшения примесей (в пентаоксиде ниобия) в ряду Nb_2O_5 (I) $\rightarrow Nb_2O_5$ (II) $\rightarrow Nb_2O_5$ (III) $\Delta S_{уд.опт.}$ сдвигается в сторону более высокой дисперсности Nb_2O_5 , компенсирующей меньшее содержание примесей. С изменениями $S_{уд}$ связаны и изменения фазовых соотношений в ТР, что влечет за собой немонотонное поведение структурных и электрофизических характеристик с оптимумами, соответствующими $\Delta S_{уд.опт.}$.

Установлено существенное (критическое) влияние примеси фтора F в Nb_2O_5 на кинетику образования ТР, динамику их уплотнения при спекании, формирование определенных фазовых соотношений, механических и электрофизических свойств ТР [26]. Рассмотрена природа и роль образующихся в НЦМ жидких фаз (ЖФ) различного характера, с одной из которых связано явление

вторичной прерывистой рекристаллизации, не наблюдаемой обычно в сегнетокерамиках [27].

Полученные результаты послужили основой для разработки технологии получения пентаоксида ниобия для изготовления ниобатной пьезокерамики [28].

Выводы

Рентгенографически показано существование модулированных структур в монооксиде Nb_2O_5 , а также в бинарных и тройных Nb-содержащих керамиках соединений $NaNbO_3$, $LiNbO_3$ и др. Установлена зависимость параметров возникающих структур от термодинамической предыстории объектов. Определены требования, предъявляемые к Nb_2O_5 , обеспечивающие оптимальность свойств ниобатных материалов.

Представленные результаты целесообразно использовать при разработке сегнетопьезоэлектрических материалов на основе ниобатов щелочных металлов с улучшенными свойствами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности 2023г.).

Проект № FENW-2023-0010/(Г30110/23-11-ИФ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Directive 2002/95/EU of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electronic equipment // Official Journal of the European Union. L. 37. 2003. V. 46. P. 19—23.
2. Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment // Official Journal of the European Union. L. 174. 2011. V. 54. P. 88—110.
3. Yan Y., Xu Y., Feng Y. Effect of Mn doping on the piezoelectric properties of $0.82Pb(Zr_{1/2}Ti_{1/2})O_3-0.03Pb(Mn_{1/3}Sb_{2/3})O_3-0.15Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ ferroelectric ceramics // Ceramics International. 2014. V. 40. P. 5897—5903.
4. Zachariasz R., Bochenek D. Modified PZT ceramics as a material that can be used in micromechatronics // European Physical Journal B. 2015. V. 88. № 11. P. 296-1—4.
5. Chen Y., Bao X., Wong C.-M. et al. PZT ceramics fabricated based on stereolithography for an ultrasound transducer array application // Ceramics International. 2018. V. 44. P. 22725—22730.
6. Vuong L. D., Gio P. D., Quang N. D. V., Hieu T. D., Nam T. P. Development of $0.8Pb(Zr_{0.48}Ti_{0.52})O_3-0.2Pb[(Zn_{1/3}Nb_{2/3})-0.625(Mn_{1/3}Nb_{2/3})_{0.375}]O_3$ Ceramics for High-Intensity Ultrasound Applications // J. Electronic Materials. 2018. V. 47. № 10. P. 5944—5951.
7. Вербенко И. А., Резниченко Л. А. Бессвинцовая сегнетоэлектрическая керамика на основе ниобатов щелочных металлов: история, технология, перспективы: сб. трудов Второго Международного междисциплинарного молодежного симпозиума "Физика бессвинцовых пьезоактивных и родственных материалов. (Анализ современного состояния и

перспективы развития" ("LFRM-2013"). 2—6 сентября 2013, г. Ростов-на-Дону — г. Туапсе. 2013. — Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ. Т. 1. С. 52—64.

8. Резниченко Л. А., Разумовская О. Н., Дудкина С. И. и др. Сегнетоактивные функциональные материалы на основе ниобатов щелочных металлов: разработка, исследования, применение: сб. мат. Пятого междисциплинарного научного форума с международным участием "Новые материалы и перспективные технологии", 30 октября — 1 ноября 2019 г., Москва. 2019. Т. 2. С. 265—266.

9. Физико-химические свойства окислов: справочник / под ред. Самсонова Г. В. — М.: Металлургия, 1978. — 154 с.

10. Янсон Г. Д. Высокотемпературные процессы в литийсодержащих системах: тез. докл. VIII Всесоюз. конф. по термическому анализу. — Куйбышев: Изд-во Куйбыш. Дома техники, 1982. С. 70.

11. Резниченко Л. А., Вербенко И. А., Шилкина Л. А., Дудкина С. И. Влияние физико-химического состояния пентаоксида ниобия на свойства функциональных сегнетопъезо-керамических материалов: сб. тез. докл. IX Всерос. конф. "Керамика и композиционные материалы", 23—26 мая 2016 г., г. Сыктывкар, Коми НЦ УрО РАН. С. 386—389.

12. Титов В. В., Титов С. В., Резниченко Л. А. Влияние полиморфизма Nb_2O_5 на мультифрактальные параметры зеренной структуры, совершенство кристаллической структуры и свойства ниобатных сегнетокерамик // Физическая мезомеханика. 2004. Спецвыпуск. Т. 7. Ч. 1. С. 275—278.

13. Кузнецова Е. М., Резниченко Л. А., Разумовская О. Н., Шилкина Л. А. Полиморфизм пентаоксида ниобия и свойства ниобатов щелочных металлов — основ сегнетопъезо-электрических материалов // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. № 5. С. 36—41.

14. Резниченко Л. А., Разумовская О. Н., Иванова Л. С., Шилкина Л. А. Зависимость свойств ниобатной пьезокерамики от дисперсности Nb_2O_5 различных квалификаций // Неорган. материалы. 1993. Т. 29. № 7. С. 1004—1007.

15. Резниченко Л. А., Разумовская О. Н., Шилкина Л. А. и др. Зависимость свойств ниобатной пьезокерамики от примесного состава пентаоксида ниобия // Изв. АН СССР. Неорган. материалы. 1988. Т. 24. № 10. С. 1708—1715.

16. Ниобия пятиокись. Технические условия. ГОСТ 23620-79. — М.: Изд-во стандартов, 1979. — 8 с.

17. Рао Ч. Н. Р., Гопалакришнан Дж. Новые направления в химии твердого тела. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-е, 1990. — 520 с.

18. Петренко А. Г., Приседский В. В. Дефекты структуры в сегнетоэлектриках. — Киев: УМК ВШ, 1989. — 102 с.

19. Резниченко Л. А., Шилкина Л. А., Гагарина Е. С. Кристаллографический сдвиг в ниобиевых оксидах различного состава // Кристаллография. 2004. Т. 49. № 5. С. 909—916.

20. Фесенко Е. Г. Семейство перовскита и сегнетоэлектричество. — М.: Атомиздат, 1972. — 248 с.

21. Резниченко Л. А., Желнова О. А., Иванова Л. С. и др. Влияние дисперсионных характеристик сырья на свойства ниобатной пьезокерамики // Неорган. материалы. 1993. Т. 29. № 6. С. 862—867.

22. Резниченко Л. А., Разумовская О. Н., Комаров В. Д. и др. Влияние дисперсности исходного пентаоксида ниобия на свойства пьезокерамики // Изв. АН СССР. Неорган. материалы. 1990. Т. 26. № 10. С. 2184—2189.

23. Коваленко М. И., Резниченко Л. А., Разумовская О. Н., Крамаров С. О. Зависимость прочностных свойств ниобатной сегнетокерамики от дисперсности пентаоксида ниобия // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. № 24. С. 1—6.

24. Фесенко Е. Г., Филиппов В. С., Куприянов М. Ф. Однородный параметр, характеризующий деформацию перовскитной ячейки // ФТТ. 1969. Т. 11. № 2. С. 466—471.

25. Квапулинский Я., Суровьяк З., Куприянов М. Ф. и др. Исследования процессов поляризации сегнетоэлектрической керамики // ЖТФ. 1979. Т. 49. № 5. С. 1049—1052.

26. Коваленко М. И., Резниченко Л. А., Разумовская О. Н. и др. Прочность и электрофизические свойства фторсодержащей ниобатной сегнетокерамики // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. № 23. С. 30—37.

27. Reznitchenko L. A., Alyoshin V. A., Klevtsov A. N. et al. Secondary discontinuous recrystallization as a manifestation of the effect of self-organization in niobate ferroelectric ceramics // Ferroelectrics. 2000. V. 247 (1–3). P. 95—105.

28. Разумовская О. Н., Резниченко Л. А., Шилкина Л. А., Пиралова А. Т. Разработка технологии получения пентаоксида ниобия для ниобатной пьезокерамики: сб. науч. тр. "Повышение эффективности использования ниобия в народном хозяйстве". (Сырьевые источники, технология переработки сырья, применение ниобия). 1986. Ч. 1. С. 96—100.

Effect of the physical and chemical state of niobium pentoxide on the properties of composite niobate materials

(Review)

S. I. DUDKINA, K. P. ANDRYUSHIN, L. A. SHILKINA, I. N. ANDRYUSHINA,
I. A. VERBENKO, L. A. REZNICHENKO

Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

The article presents a review of publications devoted to the study of the dependence of the properties of niobate materials on the state of the Nb_2O_5 used. The existence of modulated structures in Nb_2O_5 monoxide, as well as in binary and ternary Nb-containing ceramics of the compounds $NaNbO_3$, $LiNbO_3$, etc., is shown by X-ray diffraction. The dependence of the parameters of emerging structures on the thermodynamic history of objects is established. The requirements for Nb_2O_5 , which ensure the optimal properties of niobate materials, are determined.

Keywords: lead-free compositions, niobium pentoxide, crystallographic shift, thermodynamic background.

Конструкции из композиционных материалов: Межотр. науч.-техн. журн. / Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»; Акционерное общество «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева»; Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». 2023. Вып. 4 (172). С. 1—52.

Компьютерная верстка *Н. В. Ильина, К. В. Трыкина*

Подписано в печать 15.11.2023. Формат 60х84 1/8.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,0 . Уч.-изд. л. 6,2.
Тираж 250 экз. Заказ 2025. Свободная цена.
Адрес редакции: 125424, Москва,
Волоколамское ш., д. 77,
ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».
www.ntskompas.ru; E-mail: izdanie@ntskompas.ru
Отпечатано: 101000, Москва,
Лубянский проезд, д. 15, стр. 4, помещ. IX, ком. 15, 16
ООО «Спиди-Принт.ру»
Индекс 80089.