

УДК 531.8:666.3:004.94

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния керамической пластины при ударе

О.В. Татарников^{1,2}, Д.А. Рогов³, А.Н. Прасолов³¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана² Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова³ АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина

Numerical modeling of the stress-strain state of a ceramic plate under impact loading

O.V. Tatarnikov^{1,2}, D.A. Rogov³, A.N. Prasolov³¹ Bauman Moscow State Technical University² Plekhanov University of Economics³ Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya named after A.G. Romashin JSC

Рассмотрено ударное взаимодействие керамической толстостенной пластины со стальным сферическим ударником при его свободном падении. Динамическое напряженно-деформированное состояние определено с помощью нелинейной конечно-элементной расчетной модели с учетом переменной площади пятна контакта взаимодействующих тел. Разработанный подход позволяет определять критическое напряженно-деформированное состояние и характер откольного разрушения керамической пластины. Предлагаемая расчетная модель построена и апробирована в программном комплексе FEMAP-NASTRAN.

EDN: IVKYMI, <https://elibrary/ivkymi>

Ключевые слова: ударное нагружение, керамическая пластина, динамическое напряженно-деформированное состояние, откольная прочность, конечно-элементная модель

The impact interaction of a steel spherical striker with a ceramic thick-walled plate is considered. The dynamic stress-strain state is determined using a nonlinear finite element calculation model, which takes into account the variable area of the contact spot of the interacting bodies. The calculation technique makes it possible to determine the critical stress-strain state and the nature of spallation failure of a ceramic plate. The proposed calculation model is built and tested in the FEMAP NASTRAN software package.

EDN: IVKYMI, <https://elibrary/ivkymi>

Keywords: impact loading, ceramic plate, dynamic stress-strain state, spall strength, finite element model

Керамические материалы, широко применяемые в различных изделиях авиационной и ракетно-космической техники, в процессе эксплуатации, изготовления и транспортирования могут подвергаться различным ударным воздействиям [1, 2]. Отличительной особенностью

таких материалов является хрупкий характер разрушения и значительный разброс прочностных характеристик.

В работах [3, 4] приведены результаты экспериментальных исследований прочностных характеристик кварцевой керамики и стати-

стического определения параметров их распределения.

При ударном нагружении тонкостенных керамических элементов конструкций на свободной поверхности оболочки происходит отражение ударного импульса, в результате которого могут возникать откольные явления. Все известные экспериментальные методы исследования откольной прочности дают лишь косвенную информацию о действующих напряжениях в испытуемом образце при его разрушении [5–9]. В связи с этим большое значение приобретают расчетные методы моделирования динамического напряженно-деформированного состояния, позволяющие определять критические напряжения, а также критические динамические нагрузки, которые приводят к разрушению различных типов материалов при ударном воздействии. Среди публикаций на эту тему можно отметить работы [10, 11], посвященные численному моделированию поведения полимерных композитов при низкоскоростных ударных воздействиях. Моделирование выполнено с помощью сеточно-характеристического метода, рассмотрены различные критерии разрушения композитов.

В статье [12] приведены результаты численного моделирования процесса испытаний на низкоскоростной удар пластины из многослойных композиционных материалов. Результаты моделирования оказались сопоставимыми с экспериментальными данными по размерам повреждения.

Цель работы — исследование ударного взаимодействия стального ударника сферической формы с керамической пластиной.

Диаметр ударника — шара — составлял 25,2 мм, керамическая пластинка из стеклокерамики ОТМ-357 имела форму диска с диаметром 50 мм и толщиной 4,2 мм и свободно опиралась на кольцевую оправку. Удар проводили по центру диска при свободном падении шара с некоторой высоты. Ударное воздействие такого типа считают низкоскоростным [8, 10].

Механические характеристики стального шара приняты следующими: модуль Юнга — 200 ГПа, коэффициент Пуассона — 0,3; плотность — 7800 кг/м³. Модуль Юнга керамики составлял 56 ГПа, коэффициент Пуассона — 0,2, плотность — 2500 кг/м³.

Расчетная модель процесса столкновения. Математическая модель процесса упругого

столкновения двух тел в общем случае должна описывать нелинейные динамические трехмерные деформации и напряжения, возникающие в сталкивающихся телах. Динамический характер процесса связан с тем, что характерное время упругого контакта соизмеримо со временем распространения упругих волн в сталкивающихся телах.

Нелинейность может быть вызвана тремя факторами: возникновением нелинейно-упругих или пластических деформаций в ударнике и мишени в зоне контакта, большими перемещениями мишени, а также изменяющейся (переменной) поверхностью контакта. Учитывая то, что деформации, которые возникают в керамических материалах, остаются малыми и линейно-упругими вплоть до разрушения материала, рассматривали только третий фактор нелинейности.

Для учета переменной поверхности контакта в конечно-элементной модели использовали Гар-элементы, представляющие собой одномерные нелинейные элементы с переменными жесткостями на растяжение и сжатие. При этом жесткости на растяжение Гар-элементов считали равными нулю, а жесткости на сжатие, являлись конечными величинами, определяемыми в процессе исследования сходимости расчетной модели.

Конечно-элементную модель зоны контакта шара и пластины строили в цилиндрической системе координат с осью Z , направленной перпендикулярно пластине, как показано на рис. 1. Учитывая симметрию задачи, рассматривали 1/8 часть пластины и 1/16 часть шара.

Свойства материалов и конечных элементов. Диалоговое окно для задания свойств керамики ОТМ-357 при расчете показано на рис. 2.

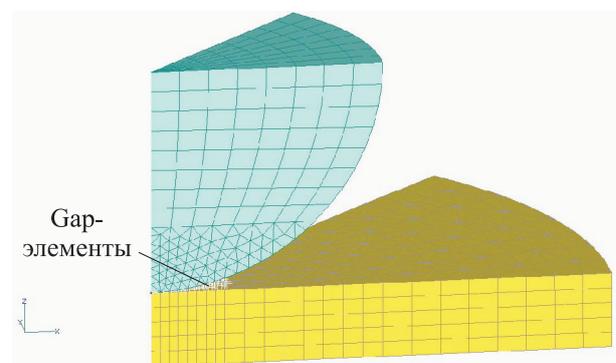


Рис. 1. Конечно-элементная модель зоны контакта шара и пластины

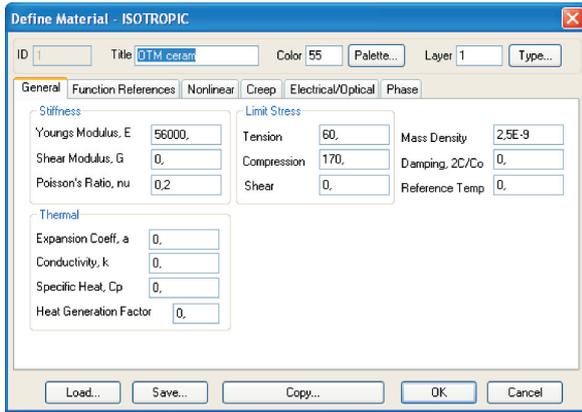
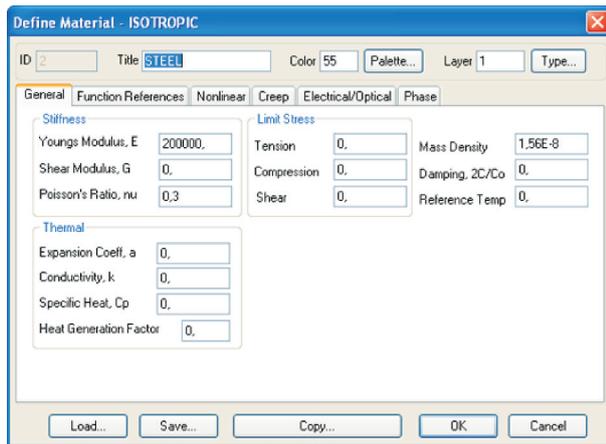
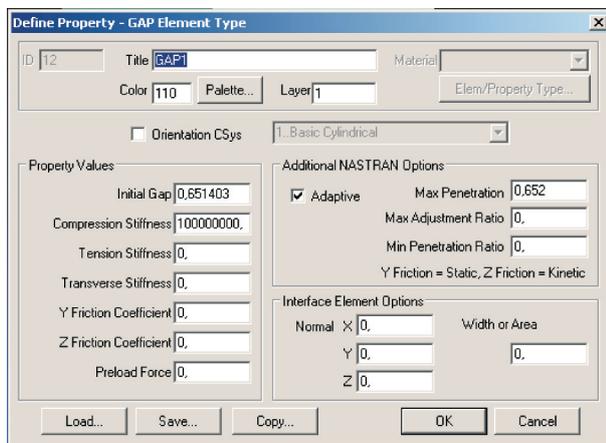


Рис. 2. Диалоговое окно для задания свойств керамики OTM-357

При расчете плотность стали удваивали, так как в расчетной модели рассматривали 1/16 часть шара, и в то же время 1/8 часть пластины. Диалоговое окно для задания свойств стали при расчете приведено на рис. 3, а.



а



б

Рис. 3. Диалоговые окна для задания свойств стали (а) и Гар-элемента (б)

В качестве примера задания свойств Гар-элементов на рис. 3, б показано диалоговое окно со свойствами элементов, которые моделируют зазор, первоначальное значение которого в нижней части шара $\Delta z = 0,65$ мм.

Граничные и начальные условия. Граничные и начальные условия задавали в цилиндрической системе координат. На вертикальных гранях пластины и шара задавали кинематические граничные условия симметрии — равенство нулю окружных перемещений ($U_\theta = 0$), на оси симметрии расчетной модели принимали равными нулю радиальные перемещения ($U_r = 0$). На нижнем контуре пластины задавали граничные условия закрепления в направлении оси OZ $U_z = 0$ (рис. 4). Таким образом, моделировали экспериментальные условия закрепления круглой пластины: свободное опирание пластины на кольцевую оправку.

В качестве начальных условий выступала скорость перемещения узловых точек конечно-элементной модели шара в момент столкновения с пластиной

$$v_0 = \sqrt{2gH},$$

где H — высота падения шара; g — ускорение свободного падения.

В качестве объемной нагрузки задавали силы веса пластины $P_{пл}$ и шара $P_{ш}$ (рис. 5), определяемые выражениями

$$P_{пл} = \rho_{пл}g; \quad P_{ш} = \rho_{ш}g,$$

где $\rho_{пл}$ и $\rho_{ш}$ — плотности материалов пластины и шара.

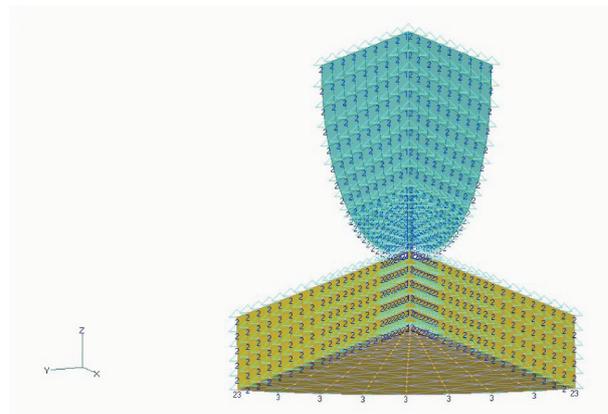


Рис. 4. Граничные условия на вертикальных гранях расчетной модели

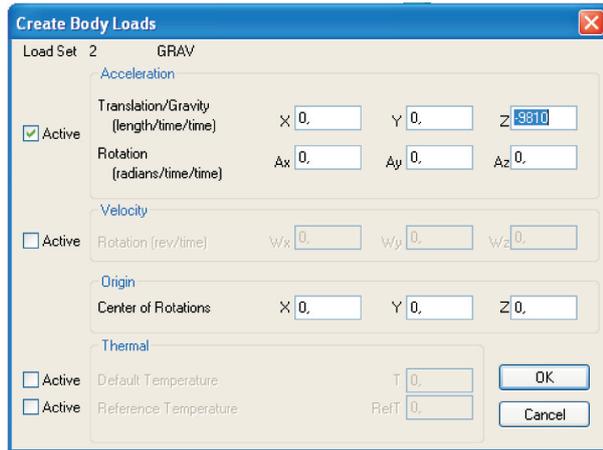


Рис. 5. Диалоговое окно для задания объемной нагрузки

Апробация расчетной модели. Проверку расчетной модели проводили путем сравнения численного решения с известным аналитическим решением контактной задачи о взаимодействии двух соприкасающихся упругих сферических тел, полученным на основе решения задачи Герца о сосредоточенной силе, действующей на полуплоскость [13–15].

Рассматривали контактное напряженно-деформированное состояние шара и толстой пластины. Толстая пластина моделировала полуплоскость (сферическое тело с радиусом, стремящимся к бесконечности). Шар и пластину полагали выполненными из стали. Радиус шара $R = 12,6$ мм, радиус пластины $R = 25$ мм, толщина пластины $h = 12,6$ мм.

Между шаром и пластиной действует давление, вызванное сжимающей силой $P = 48\,000$ МПа, действующей вдоль оси Z . Однако в силу того, что рассматривали 1/8 часть пластины, в расчетной модели в центре шарового сектора прикладывали силу $P = 6000$ МПа.

Расчетная схема для тестовой задачи приведена на рис. 6, а, а некоторые результаты расчета контактной задачи — на рис. 6, б–г. На рис. 6, б показано распределение нормальных напряжений σ_z , а на рис. 6, в и г — возникновение поверхности контакта в результате взаимодействия тел.

Распределения осевых перемещений Гаг-элементов U_z и исходного зазора между шаром и пластиной Δz вдоль оси r цилиндрической системы координат показаны на рис. 7. Там же

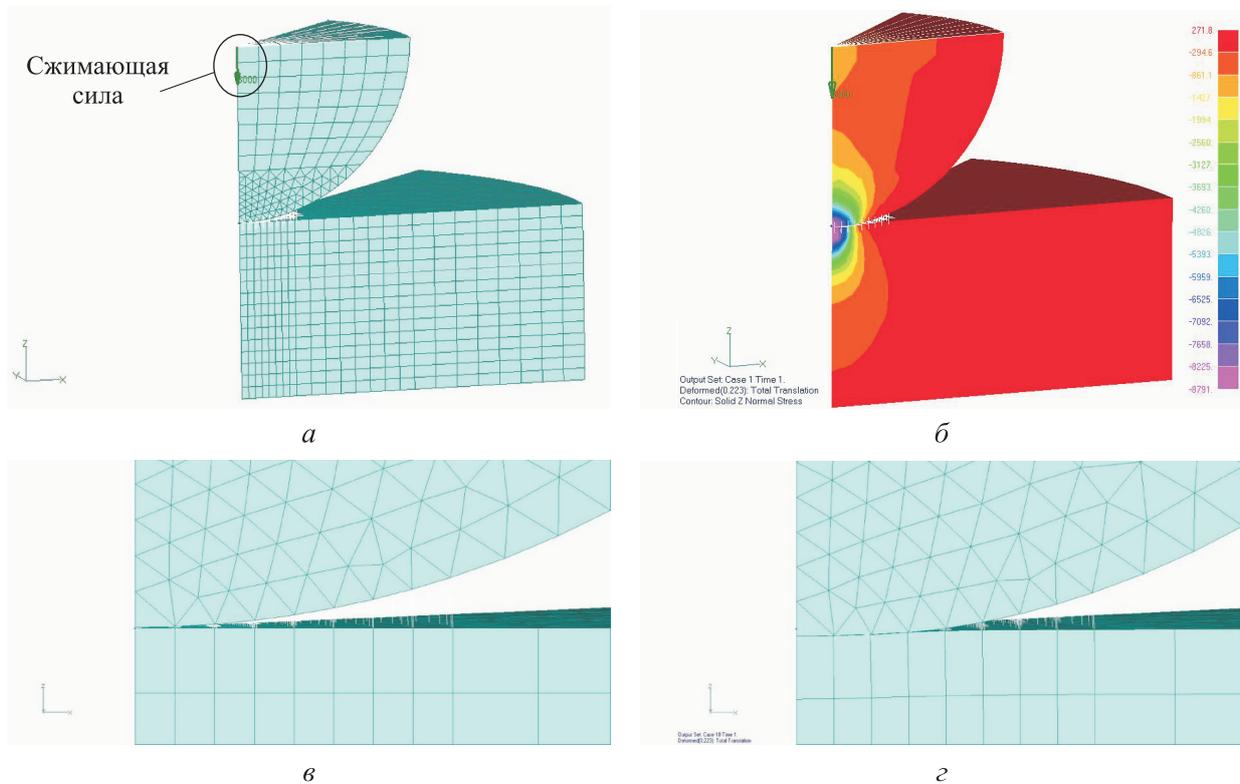


Рис. 6. Расчетная модель для задачи Герца (а) и результаты расчетов контактной задачи (б)–(г): б — распределение напряжений σ_z в контактирующих телах; в и г — формирование поверхности контакта — взаимное положение шара и пластины до взаимодействия и возникновения поверхности контакта в результате взаимодействия

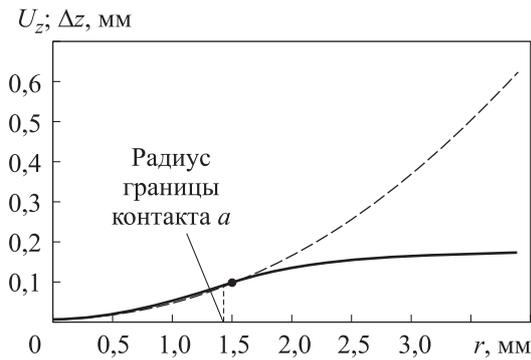


Рис. 7. Распределение осевых перемещений Гар-элементов U_z (—) и исходного зазора между шаром и пластиной Δz (---) вдоль оси r цилиндрической системы координат

точкой обозначен радиус границы радиуса a области контакта между шаром и плоскостью, возникшей в результате взаимодействия.

Сравнение результатов численного и аналитического решений проводили для двух параметров: радиуса границы контакта a и максимального давления в центре поверхности контакта q_0 .

Эти параметры определяли по формулам, полученным из аналитического решения рассматриваемой задачи [13]:

$$a = 1,109\sqrt[3]{PR/E};$$

$$q_0 = 0,388\sqrt[3]{PE^2/R^2},$$

где E — модуль Юнга шара и пластины.

Результаты численного и аналитического расчета радиуса границы контакта и максимального давления в центре поверхности контакта, приведенные в таблице, показывают хорошее совпадение.

Анализ результатов численного расчета тестовой задачи позволил обосновано определить параметры конечно-элементной модели, в том числе характеристики Гар-элементов.

Результаты численного и аналитического расчета

Способ расчета	Радиус границы контакта a , мм	Максимальное давление в центре поверхности контакта q_0 , МПа
Аналитический	1,604	8906
Численный	1,505	8790
Относительная погрешность, %	6,2	1,3

Исходные данные для динамической задачи.

Результаты испытаний на ударную прочность керамики ОТМ-357, проведенных специалистами АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина, показали, что средняя высота падения стального шара, при которой происходит разрушение керамики, составляет 1000 мм.

В расчетной модели начальные условия, соответствующие высоте падения 1000 мм задавали, как показано на рис. 8, а, а граничные условия — как в предыдущем разделе.

Для задания параметров динамического нагружения, а также для определения временного интервала интегрирования выполняли расчет низшей собственной частоты колебаний пластины. Расчетная собственная частота ν составляла 6951 Гц. Форма колебаний, соответствующая низшей частоте керамической пластины, показана на рис. 8, б.

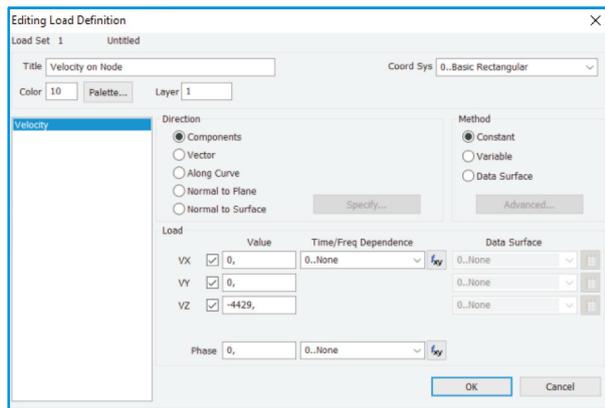
Период колебаний пластины $T = 1,4 \cdot 10^{-4}$ с, поэтому в качестве интервала интегрирования, который должен его превышать, приняли промежуток времени $\tau = 2 \cdot 10^{-4}$ с. Число шагов интегрирования по времени выбрано равным 100. Параметры динамического и нелинейного нагружения для объемной нагрузки задавали, как показано на рис. 8, в и г.

Результаты расчетов ударного взаимодействия стального шара и керамической пластины.

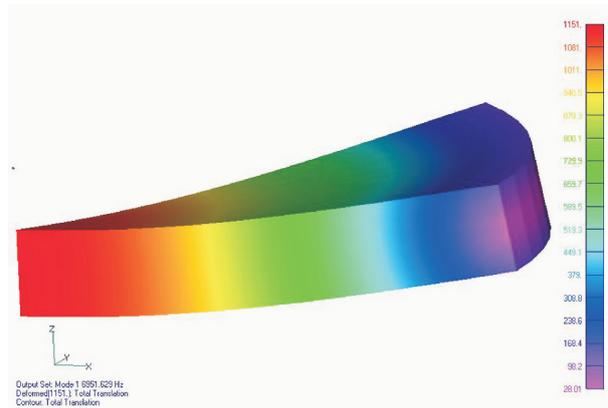
Зависимость осевых перемещений U_z точки контакта керамической пластины от времени τ приведена на рис. 9. Максимальный прогиб составил 0,11923 мм.

Характер напряженного состояния керамической пластины иллюстрируют рис. 10, а–в. Здесь показаны напряжения, возникающие в момент ее максимального прогиба. Самыми опасными для керамики являются растягивающие напряжения, которые формируются в нижней грани пластины. Наибольшего уровня в центре нижней грани пластины достигают радиальные σ_r и окружные σ_θ напряжения.

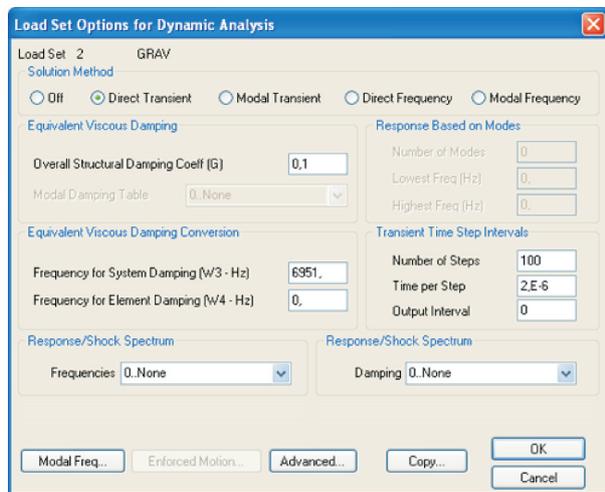
Керамические материалы по характеру разрушения являются хрупкими. В качестве критерия прочности для них достаточно хорошо себя зарекомендовал критерий максимальных главных напряжений. Распределение этих напряжений σ_1 в момент максимального прогиба пластины показано на рис. 10, г. Анализируя его, можно заключить, что при достижении максимальными напряжениями предельного



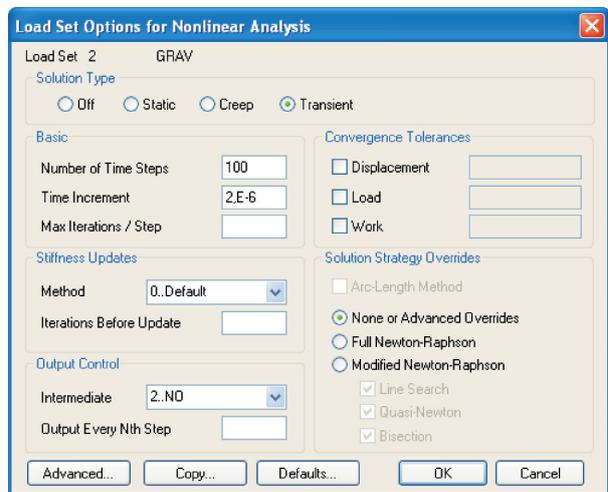
а



б



в



г

Рис. 8. Исходные данные для динамической задачи:

а — диалоговое окно для задания начальных условий;

б — форма колебаний, соответствующая нижней частоте керамической пластины;

в и г — диалоговые окна для задания параметров динамического и нелинейного нагружения

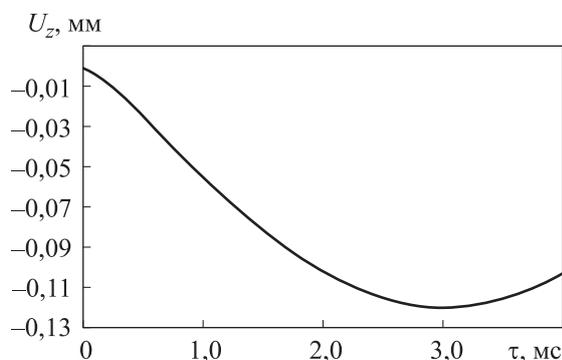
уровня произойдет разрушение в виде откола нижней части пластины.

При анализе прочности материала важно учитывать вид напряженного состояния в рас-

сматриваемой области. Так, наиболее благоприятной для разрушения является ситуация максимального различия значений главных напряжений.

Если рассмотреть соотношение между главными напряжениями в центре пластины и на некотором удалении от него, то можно убедиться, что в центре пластины реализуется напряженное состояние, близкое к двухосному всестороннему растяжению. По мере удаления от центра напряженное состояние перестает быть всесторонним, так как окружные напряжения начинают преобладать над радиальными, что отражено на рис. 10, а и б.

Зависимости главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 от времени τ в центре нижней грани пластины и в точках окружности, расположенных на расстоянии 3,5 мм от центра, показаны на рис. 11, а и б.

Рис. 9. Зависимость осевых перемещений U_z точки контакта керамической пластины от времени τ

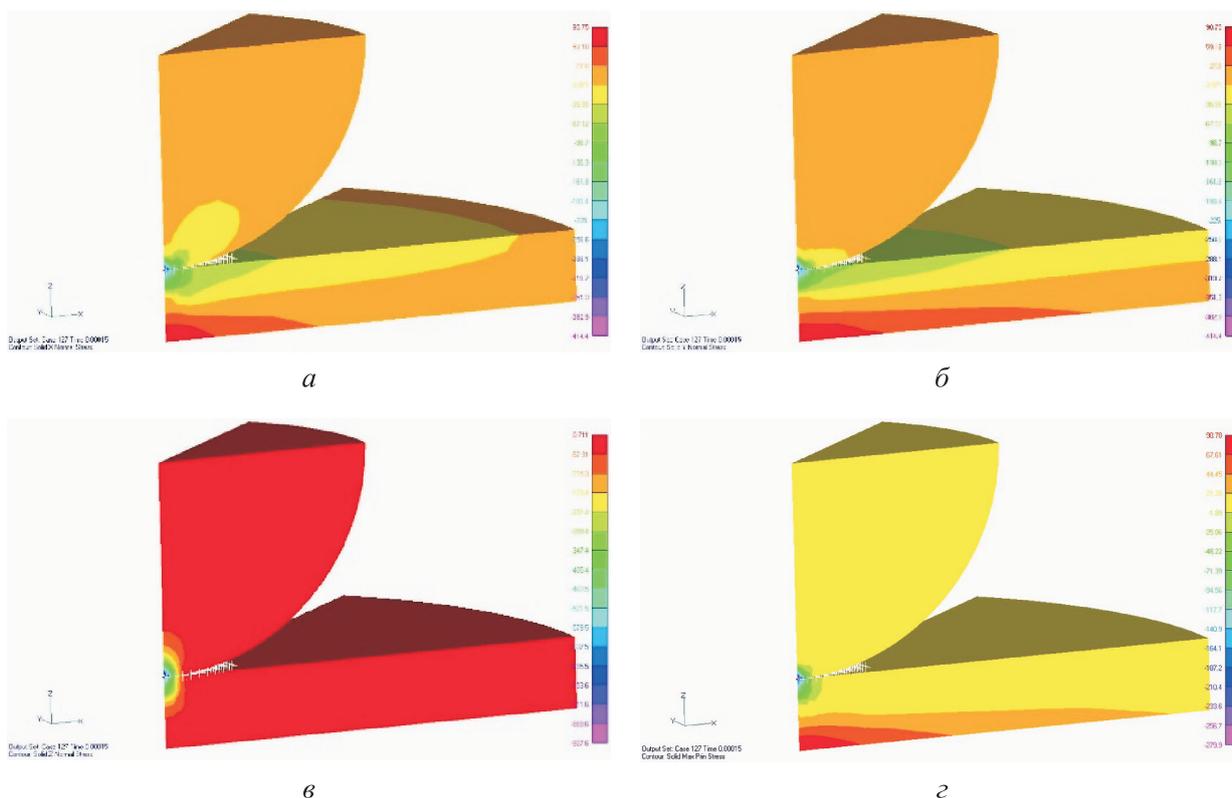


Рис. 10. Распределения радиальных σ_r (а), окружных σ_θ (б), осевых σ_z (в) и максимальных главных σ_1 (г) напряжений по пластине, возникающих в момент ее максимального прогиба

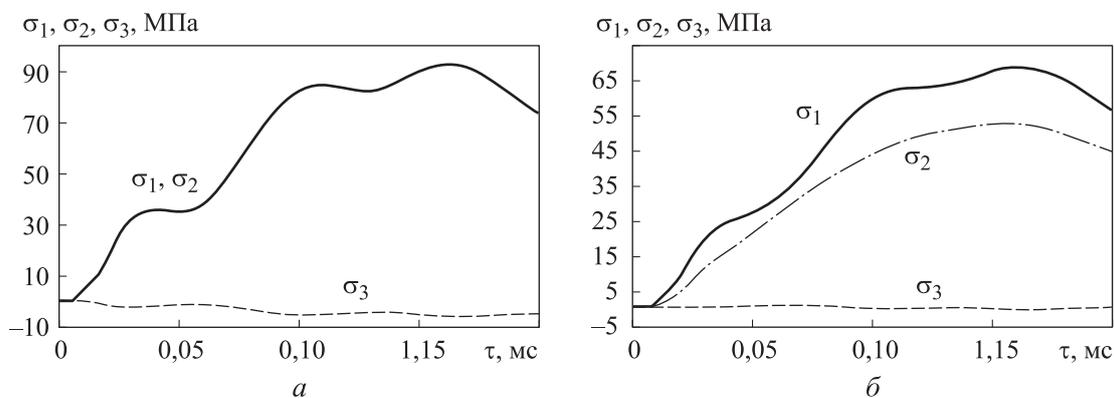


Рис. 11. Зависимости главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 от времени τ в центре нижней грани пластины (а) и в точках окружности, расположенных на расстоянии 3,5 мм от центра (б)

На рис. 12 выделена область, в которой значения максимальных главных напряжений находятся в диапазоне 60,0...93,5 МПа. Если принять в качестве критического — напряжение при одноосном растяжении, которое для керамики ОТМ-375 равно 60 МПа, то выделенная область будет зоной возможного разрушения материала. Причем наиболее вероятные области начала разрушения будут расположены

на некотором расстоянии от центра пластины, где напряженное состояние не является всесторонним плоским растяжением.

Результат численного моделирования хорошо согласован с данными экспериментов, проведенных специалистами АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина, в которых установлено, что при свободном опирании пластины на кольцевую оправку в результате

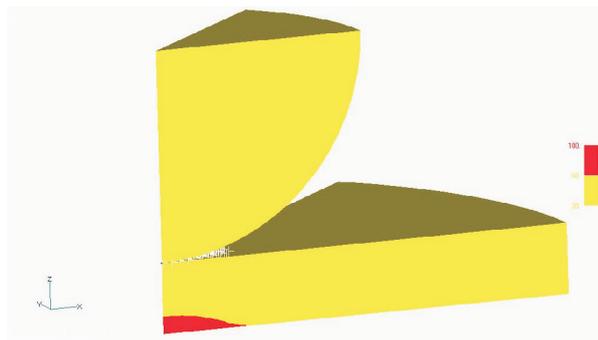


Рис. 12. Модель области разрушения керамики ОТМ-375

ударного воздействия происходит откол материала с нижней поверхности пластины в области, расположенной под точкой контакта.

Выводы

1. Предложена конечно-элементная расчетная модель для определения динамического напряженно-деформированного состояния и откольной прочности керамических материалов при ударном воздействии.

2. Расчетная модель апробирована путем сравнения результатов численного и аналитического решений задачи Герца о контактном взаимодействии.

3. Расчеты показали согласованность численных результатов с данными экспериментов по определению критической высоты падения металлического шара на керамическую пластинку, проведенных специалистами АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина.

Литература

- [1] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. Москва, Физматлит, 2008. 656 с.
- [2] Hu N., Zemba Y., Okabe T. et al. A new cohesive model for simulating delamination propagation in composite laminates under transverse loads. *Mech. Mater.*, 2008, vol. 40, no. 11, pp. 920–935, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2008.05.003>
- [3] Кирюшина В.В., Левшанов В.С., Фетисов В.С. и др. Оценка допустимого уровня прочности керамического материала при аттестации антенных обтекателей летательных аппаратов. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2011, № 12, с. 27–31.
- [4] Кирюшина В.В., Левшанов В.С., Фетисов В.С. и др. Оценка параметров распределения Вейбулла при анализе прочности керамических материалов для обтекателей. *Механика композиционных материалов и конструкций*, 2006, т. 12, № 1, с. 76–82.
- [5] Lopresto V., Caprino G., Abrate S. et al. Damage mechanisms and energy absorption in composite laminates under low velocity impact loads. In: *Dynamic failure of composite and sandwich structures*. Springer, 2013, pp. 209–289, doi: https://doi.org/10.1007/978-94-007-5329-7_6
- [6] Вшивков О.Ю., Рыбаков А.П., Ильин В.В. Откольная прочность материалов. *Химическая физика*, 2007, т. 26, № 2, с. 60–63.
- [7] Кудинов В.В., Крылов И.К., Мамонов В.И. и др. Разрушение композиционных материалов при низкоскоростном ударе. *Физика и химия обработки материалов*, 2018, № 3, с. 66–71, doi: <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2018-3-66-71>
- [8] Richardson M.O.W., Wisheart M.J. Review of low-velocity impact properties of composite materials. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 1996, vol. 29, no. 12, pp. 1123–1131, doi: [https://doi.org/10.1016/1359-835X\(96\)00074-7](https://doi.org/10.1016/1359-835X(96)00074-7)
- [9] Hinton M.J., Kaddour A.S. Maturity of 3D failure criteria for fiber-reinforced composites: comparison between theories and experiments: part B of WWFE-II. *J. Compos. Mater.*, 2013, vol. 47, no. 6–7, pp. 925–966, doi: <https://doi.org/10.1177/0021998313478710>
- [10] Беклемышева К.А., Васюков А.В., Ермаков А.С. и др. Численное моделирование динамических процессов при низкоскоростном ударе по композитной стрингерной панели. *Математическое моделирование*, 2014, т. 26, № 9, с. 96–110.
- [11] Беклемышева К.А., Петров И.Б. Моделирование разрушения гибридных композитов под действием низкоскоростного удара. *Математическое моделирование*, 2018, т. 30, № 11, с. 27–43.
- [12] Балданов А.Б., Бохоева Л.А., Бочектуева А.С. Моделирование процессов деформирования и разрушения слоистых композиционных материалов при локальном ударе.

Динамика систем, механизмов и машин, 2021, т. 9, № 1, с. 2–7, doi: <https://doi.org/10.25206/2310-9793-9-1-2-7>

- [13] Тимошенко С.П., Гудьер Дж. *Теория упругости*. Москва, Наука, 1975. 576 с.
- [14] Нахатакян Ф.Г. Механика контактного сближения упругих тел в задаче Герца. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2010, № 5, с. 48–56.
- [15] Шитикова М.В. Удар жесткого шара по бесконечной пластинке Кирхгофа — Лява с учетом объемной и сдвиговой релаксации. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*, 2023, т. 10, № 1, с. 139–154, doi: <https://doi.org/10.21638/spbu01.2023.112>

References

- [1] Zeldovich Ya.B., Rayzer Yu.P. *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy* [Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 656 p. (In Russ.).
- [2] Hu N., Zemba Y., Okabe T. et al. A new cohesive model for simulating delamination propagation in composite laminates under transverse loads. *Mech. Mater.*, 2008, vol. 40, no. 11, pp. 920–935, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2008.05.003>
- [3] Kiryushina V.V., Levshanov V.S., Fetisov V.S. et al. Estimation of allowed strength level of ceramic material when certifying aircraft radomes. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik* [All Materials. Encyclopaedic Reference Manual], 2011, no. 12, pp. 27–31. (In Russ.).
- [4] Kiryushina V.V., Levshanov V.S., Fetisov V.S. et al. Estimation of Weibull distribution parameters in strength analysis of ceramic materials for fairings. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy*, 2006, vol. 12, no. 1, pp. 76–82. (In Russ.).
- [5] Lopresto V., Caprino G., Abrate S. et al. Damage mechanisms and energy absorption in composite laminates under low velocity impact loads. In: *Dynamic failure of composite and sandwich structures*. Springer, 2013, pp. 209–289, doi: https://doi.org/10.1007/978-94-007-5329-7_6
- [6] Vshivkov O.Yu., Rybakov A.P., Ilin V.V. Chipping strength of materials. *Khimicheskaya fizika*, 2007, vol. 26, no. 2, pp. 60–63. (In Russ.).
- [7] Kudinov V.V., Krylov I.K., Mamonov V.I. et al. Fracture of composite materials under low-velocity impact. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Materials Treatment], 2018, no. 3, pp. 66–71, doi: <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2018-3-66-71> (in Russ.).
- [8] Richardson M.O.W., Wisheart M.J. Review of low-velocity impact properties of composite materials. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 1996, vol. 29, no. 12, pp. 1123–1131, doi: [https://doi.org/10.1016/1359-835X\(96\)00074-7](https://doi.org/10.1016/1359-835X(96)00074-7)
- [9] Hinton M.J., Kaddour A.S. Maturity of 3D failure criteria for fiber-reinforced composites: comparison between theories and experiments: part B of WWFE-II. *J. Compos. Mater.*, 2013, vol. 47, no. 6–7, pp. 925–966, doi: <https://doi.org/10.1177/0021998313478710>
- [10] Beklemysheva K.A., Vasyukov A.V., Ermakov A.S. et al. Numerical modeling of low energy strike at composite stringer panel. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2014, vol. 26, no. 9, pp. 96–110. (In Russ.).
- [11] Beklemysheva K.A., Petrov I.B. Damage modeling in hybrid composites subject to low-speed impact. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2018, vol. 30, no. 11, pp. 27–43. (In Russ.). (Eng. version: *Math. Models Comput. Simul.*, 2019, vol. 11, no. 3, pp. 469–478, doi: <https://doi.org/10.1134/S2070048219030074>)
- [12] Baldanov A.B., Bokhoeva L.A., Bochektueva A.S. Modeling of processes of deformation and destruction of layered composite materials under local impact. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin* [Dynamics of System, Mechanisms and Machines], 2021, vol. 9, no. 1, pp. 2–7, doi: <https://doi.org/10.25206/2310-9793-9-1-2-7> (in Russ.).
- [13] Timoshenko S., Goodier J.N. *Theory of elasticity*. McGraw-Hill, 1970. 608 p. (Russ. ed.: *Teoriya uprugosti*. Moscow, Nauka Publ., 1975. 576 p.)
- [14] Nakhatakyan F.G. Mechanics of contact approach of elastic bodies in Hertz problem. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2010, no. 5, pp. 48–56. (In Russ.). (Eng. ver-

sion: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2010, vol. 39, no. 5, pp. 444–451, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618810050079>)

- [15] Shitikova M.V. Impact of a rigid sphere with an infinite Kirchhoff–Love plate taking into account bulk and shear relaxation. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Astronomiya*, 2023, vol. 10, no. 1, pp. 139–154, doi: <https://doi.org/10.21638/spbu01.2023.112> (in Russ.). (Eng. version: *Vestnik St. Petersburg Univ. Math.*, 2023, vol. 56, no. 1, pp. 107–118, doi: <https://doi.org/10.1134/S1063454123010119>)

Статья поступила в редакцию 31.01.2025

Информация об авторах

ТАТАРНИКОВ Олег Вениаминович — доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана; профессор кафедры высшей математики. Российский экономический университет имени им. Г.В. Плеханова (117997, Москва, Российская Федерация, Стремянный пер. д. 36, e-mail: tatarnikov.ov@rea.ru).

РОГОВ Дмитрий Александрович — кандидат технических наук, начальник сектора расчетов прочности и надежности. АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: rogov.dmitry.76@yandex.ru).

ПРАСОЛОВ Алексей Николаевич — инженер первой категории сектора расчетов прочности и надежности. АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: prasolovan1978@gmail.com).

Information about the authors

TATARNIKOV Oleg Veniaminovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Space-Rocket Composite Design Department. Bauman Moscow State Technical University; Professor of Higher Mathematics Department. Plekhanov University of Economics (11799736, Moscow, Russian Federation, Stremyanny Lane, Bldg. 36, e-mail: tatarnikov.ov@rea.ru).

ROGOV Dmitriy Alexandrovich — Candidate of Science (Eng.), Head of Strength Calculation and Reliability Evaluation Department. Obninsk Research and Production Enterprise *Technologiya* named after A.G. Romashin JSC (249031, Obninsk, Russian Federation, Kievskoe Shosse, Bldg. 15, e-mail: rogov.dmitry.76@yandex.ru).

PRASOLOV Aleksey Nikolaevich — Engineer, Strength Calculation and Reliability Evaluation Department. Obninsk Research and Production Enterprise *Technologiya* named after A.G. Romashin JSC (249031, Obninsk, Russian Federation, Kievskoe Shosse, Bldg. 15, e-mail: prasolovan1978@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Татарников О.В., Рогов Д.А., Прасолов А.Н. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния керамической пластины при ударе. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 12, с. 109–118.

Please cite this article in English as:

Tatarnikov O.V., Rogov D.A., Prasolov A.N. Numerical modeling of the stress-strain state of a ceramic plate under impact loading. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 12, pp. 109–118.