

<u>ИПМ им.М.В.Келдыша РАН</u> • <u>Электронная библиотека</u> <u>Препринты ИПМ</u> • <u>Препринт № 56 за 2023 г.</u>



ISSN 2071-2898 (Print) ISSN 2071-2901 (Online)

<u>Д.С. Бойков</u>

Сквозной расчет термомеханических явлений в твердом теле с динамическим контролем агрегатного состояния

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International



Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Бойков Д.С. Сквозной расчет термомеханических явлений в твердом теле с динамическим контролем агрегатного состояния // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2023. № 56. 18 с. <u>https://doi.org/10.20948/prepr-2023-56</u> <u>https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2023-56</u>

Ордена Ленина ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ имени М. В. Келдыша Российской академии наук

Д. С. Бойков

Сквозной расчет термомеханических явлений в твердом теле с динамическим контролем агрегатного состояния

Mockba - 2023

Бойков Д. С.

Сквозной расчет термомеханических явлений в твердом теле с динамическим контролем агрегатного состояния

Построена комплексная компьютерная модель термомеханических явлений в твердом деформируемом материале в результате действия интенсивных потоков энергии. Разработан алгоритм сквозного расчета нагрева, испарения, динамики испаренного вещества и упругопластических волновых процессов, приводящих к разрушениям в неиспаренном твердом материале. Предложена методика динамического контроля изменения агрегатного состояния конденсированной среды. Проведены расчеты разрушения полимерных и композитных материалов под действием ионизирующих излучений.

Ключевые слова: термомеханические эффекты в твердом теле, сквозной расчет газодинамических и упругопластических волн, моделирование разрушений и отколов, динамический контроль изменения агрегатного состояния

Dmitry Sergeevich Boykov

End-to-end calculation of thermomechanical phenomena in a solid with dynamic control of the aggregate state

A complex computer model of thermomechanical phenomena in a solid deformable material as a result of the action of intense energy fluxes was constructed. An algorithm has been developed for the end-to-end calculation of heating, evaporation, dynamics of vaporized matter and elastic-plastic wave processes leading to destruction in a solid material. A method for dynamic control of changes in the aggregate state of a condensed medium was proposed. Calculations of the destruction of polymer and composite materials under the action of ionizing radiation were carried out.

Key words: thermomechanical effects in a solid, end-to-end calculation of gas-dynamic and elastoplastic waves, modeling of fractures and break-offs, dynamic control of changes in the aggregate state

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-21-00248.

Вычисления проведены с помощью гибридного суперкомпьютера K60, установленного в Суперкомпьютерном Центре коллективного пользования ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

1 Введение

Создание и исследование новых материалов является в настоящее время актуальной задачей. Активно развивается производство новых конструкционных материалов, в том числе полимеров и композитов на основе полимеров. Такие материалы применяются в аэрокосмической отрасли, в атомной и энергетической индустрии, а также для производства трубопроводов, которые представляют интерес для северных регионов страны. Исследование новых материалов – сложный и трудоемкий процесс. Проведение натурных экспериментов имеет ряд ограничений: стоимость экспериментов высока, как правило, исследуются небольшие образцы простой геометрической формы. В тех случаях, когда в качестве разрушающего воздействия используются ионизирующие излучения (например, релятивистские электронные пучки [1]), могут возникать сложности с определением параметров нагрузки. Разработка средств компьютерного моделирования и проведение вычислительных экспериментов позволяют с достаточной точностью восполнить недостающие данные.

Широкий класс прикладных задач требует подробного описания физики быстропротекающих процессов в геометрически сложных объектах с учетом исключительно трехмерных эффектов. В то же время необходимо согласованно рассчитывать сразу несколько физических процессов, таких как динамические процессы, возникающие при переходе материала в другое агрегатное состояние, пластические деформации, объемное разрушение материала, откольные явления. В таких мультифизичных задачах требуется особый подход к учету того или иного процесса. Поскольку известны критерии изменения состояния материала, можно создать необходимые методики для учета всех физических процессов, не разделяя решение на отдельные задачи. Подобный подход позволяет значительно облегчить анализ решения и оценить все динамические процессы одновременно.

2 Математическая модель газодинамических и упругопластических волновых процессов

Исходная система уравнений, описывающая термомеханические эффекты в объекте, подвергающемся воздействию интенсивного потока энергии (частицы, ионизирующее излучение), основана на моделях механики сплошной среды. Полная система уравнений включает уравнения и определяющие соотношения (кинематические, физические), описывающие гидрогазодинамику испаряемого материала, упругие, пластические волны, вязкопластические деформации и разрушение в твердом остатке мишени. Динамические процессы в материале объекта в широком диапазоне параметров состояния моделируются в приближении локального термодинамического равновесия. Уравнения динамики сплошной среды записываются в виде основных законов сохранения. В области испаряемого материала расчет производится на основе уравнений газодинамической модели:

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho + \nabla(\rho \mathbf{w}) = 0; \qquad \frac{\partial}{\partial t}\rho w_i + \sum_k \frac{\partial}{\partial x_k} \mathbf{\Pi}_{ik} = 0; \qquad \mathbf{\Pi}_{ik} = \rho w_i w_k + P\delta_{ik};$$
(1)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho E + \frac{1}{2} \rho \mathbf{w}^2 \right) + \nabla \mathbf{q} = 0; \qquad \mathbf{q} = \left(\rho E + \frac{1}{2} \rho \mathbf{w}^2 + P \right) \mathbf{w}; \qquad P = P(\rho, E).$$
(2)

Здесь ρ – плотность, **w** – вектор скорости, P – давление, E – удельная внутренняя энергия, **q** – вектор плотности потока энергии, t – время.

Система уравнений, используемая для расчета волновых процессов в деформируемом твердом теле, соответствует модели упругопластических деформаций:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla_i w_i = 0; \tag{3}$$

$$\rho \frac{\partial w_i}{\partial t} = F_i + \nabla_j \sigma_{ij}; \tag{4}$$

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} = \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} - \nabla_i q_i; \tag{5}$$

$$q_i = -\kappa(\rho, T)\nabla_i T; \tag{6}$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\nabla_i w_j + \nabla_j w_i \right); \tag{7}$$

$$\frac{\partial D_{\sigma ij}}{\partial t} + 2G\dot{\lambda}D_{\sigma ij} = 2G\left(\dot{\varepsilon}_{ij} + \frac{1}{3\rho}\frac{\partial\rho}{\partial t}\delta_{ij}\right) - 3\alpha K\left(T - T_0\right)\delta_{ij};\tag{8}$$

$$p = p(\rho, E); \qquad (9)$$

$$\sigma_{ij} = -\nabla_i p + D_{\sigma ij} + \left((3\eta - 2\mu) \dot{\varepsilon} \delta_{ij} + 2\mu \dot{\varepsilon}_{ij} \right); \tag{10}$$

$$\dot{\lambda} = \frac{3}{2Y_0^2} \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^{(p)}; \tag{11}$$

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{ij} \delta_{ij} / 3; \tag{12}$$

здесь F – вектор внешних сил, σ – тензор напряжений, $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, κ – коэффициент теплопроводности, T – температура, D – девиатор напряжений, $\dot{\lambda}$ – удельная мощность пластической деформации, G – модуль сдвига, η и μ – коэффициенты первой и второй вязкости, α – коэффициент теплового расширения, K – модуль объемного сжатия, Y_0 – предел текучести.

3 Уравнения состояния

Система законов сохранения (1)-(12) должна быть дополнена уравнениями состояния (УРС) и реологическими соотношениями, которые содержат информацию о свойствах конкретного вещества. При ударном сжатии или импульсном нагреве материала ионизирующим излучением возникают высокие концентрации энергии. Они приводят к перестройке кристаллической структуры вещества, плавлению, испарению, диссоциации и ионизации. Возникает необходимость моделировать свойства вещества в широком диапазоне изменения давления, плотности и температуры. При построении широкодиапазонных УРС необходимо использовать различные модели, имеющие существенно разные области применимости. Выбор адекватных материальных уравнений является одним из важных факторов, определяющих точность газодинамических и упругопластических расчетов.

В предлагаемых методиках использовались заранее рассчитанные УРС в табличной форме, подготовленные с помощью программного комплекса TEP-MOC [2]. Таблицы УРС содержат зависимости давления, внутренней энергии, теплопроводности и оптических свойств материала от его плотности и температуры, тем самым замыкая систему (1)-(12).

В комплексе программ TEPMOC реализованы следующие апробированные на большом количестве практических задач модели, предназначенные для расчета уравнений состояния и оптических характеристик конструкционных материалов и рабочих сред и подробно описанные в книге [3]:

- Обобщенная модель Томаса-Ферми, применимая при высоких температурах и давлениях;
- Модели ионизационного равновесия Саха-Больцмана с потенциалами ионизации, энергиями возбуждения, полученными либо из эксперимента, либо с использованием многоконфигурационного приближения Хартри-Фока, в том числе с учетом молекулярных состояний; применима при сравнительно малых плотностях и низких температурах вплоть до комнатных условий;
- Эффективный вариант модели Хартри-Фока-Слэтера и Дирака-Фока-Слэтера, необходимый для расчетов термодинамических и оптических свойств (спектральных характеристик, коэффициентов электронной теплопроводности плазмы и т.п.).

Комплекс программ TEPMOC позволяет рассчитывать табличные уравнения состояния для большинства химических элементов, а также для веществ, имеющих сложный химический состав. Для смеси элементов наиболее универсальным условием равновесия является равенство химических потенциалов компонентов смеси, причем объем "молекулы"смеси должен быть равен сумме объемов отдельных компонентов. Для плазмы кроме равенства химических потенциалов при равновесии должны выполняться равенства электронных плотностей и электронных давлений компонентов смеси. В основе методики расчета ионизационного равновесия в плазме сложного химического состава лежит модель Саха.

Для описания жидкой и твердой фазы вещества при низких температурах предназначены полуэмпирические уравнения состояния, в которых учитываются фазовые переходы, а также возможность реализации метастабильных состояний. Данные модели также реализованы в программном комплексе TEPMOC.

- Уравнение состояния QEOS [4], [5] основано на простых полуэмпирических моделях жидкости и твердого тела. Тепловое движение ионов описывается многофазным уравнением состояния, сочетающим законы Дебая, Грюнайзена, Линдеманна и законы подобия для жидкости. Зависящий от температуры коэффициент в формуле для давления для конкретного элемента уточняется с использованием экспериментального значения температуры Дебая. Вклад электронов вычисляется с использованием полуэмперической холодной кривой, тепловые электронные свойства находят из модифицированной статистической модели Томаса–Ферми.
- Термодинамически согласованное одиннадцатиконстантное УРС-11 [6], [7] строится на основе определяемых экспериментальным путем констант для нормальных условий и экстраполяции с помощью теоретических зависимостей в области существования плазмы с учетом ее неидеальности и вырождения электронного компонента. Давление и удельная внутренняя энергия складываются из потенциальных, тепловых и электронных составляющих.

В данных УРС при плотности вещества, меньшей нормальной, в некотором диапазоне температур изотермы давления немонотонны с изменением знака первой производной по плотности, то есть существуют критические параметры и область двухфазных состояний в том же смысле, что и в уравнении состояния Ван-дер-Ваальса. Учитывать такие состояния необходимо при расчетах параметров механического действия. В то же время при решении газодинамических уравнений такое поведение изотерм давления может приводить к серьёзным проблемам со сходимостью решения сеточных систем и требует коррекции. Для этого в данной области строится так называемая Максвелловская конструкция, т.е. рассчитывается равновесие фаз из условия выполнения правила Максвелла для давления насыщенного газа. Расчет волновых процессов в твердом веществе можно проводить и в приближении баротропной среды; в этом случае уравнение состояния принимается в аналитическом виде. Наиболее распространенными являются эмпирические УРС в форме Ми-Грюнайзена и в форме Тэйта. Модифицированное уравнение Тэйта включает коэффициенты, которые представляются как функции температуры и определяются на основе экспериментальных данных.

4 Динамический контроль состояния материала

При воздействии ионизирующего излучения на материал происходит абляция с его поверхности, материал вследствие возгонки мгновенно переходит в газообразное состояние, минуя жидкую фазу. Абляция материала происходит, если удельная внутренняя энергия больше либо равна энергии абляции. Таким образом определяется область которая переходит в газообразное состояние. При этом в образце в результате действия реактивных сил возникает волна сжатия в области воздействия. Вслед за волной сжатия формируется волна разрежения. Оценивая амплитуду волны разрежения, можно определить, области разрушения материала. Исходя из критерия Мизеса, можно определить в каком состоянии находится материал – в упругом или пластичном. Критерий Мизеса запишем в виде:

$$\sigma_{eq} = Y_0, \tag{13}$$

здесь

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3/2\sqrt{2J_2}},$$

$$2J_2 = (s_{xx})^2 + (s_{yy})^2 + (s_{zz})^2 + 2[(s_{xy})^2 + (s_{yz})^2 + (s_{zx})^2],$$

 σ_{eq} – эквивалентное напряжение, J_2 – второй инвариант тензора напряжений, s_{ij} – компонента девиатора напряжений.

Введем переменную Ψ и обозначим её как индикатор состояния:

$$\Psi = \begin{cases} 0, & \text{при} \quad E \ge Q_s; \\ 1, & \text{при} \quad E < Q_s & \text{и} \quad \sigma_{ij} < \Sigma_l & \text{и} \quad \sigma_{eq} < Y_0; \\ 2, & \text{при} \quad E < Q_s & \text{и} \quad \sigma_{ij} < \Sigma_l & \text{и} \quad \sigma_{eq} = Y_0; \\ 3, & \text{при} \quad E < Q_s & \text{и} \quad \sigma_{ij} \in \mathbf{Z}. \end{cases}$$
(14)

здесь E – удельная внутренняя энергия, Q_s – энергия абляции, σ_{ij} – компонента тензора напряжений, Σ_l – критическое напряжение, \mathbf{Z} – разрушенная область.

Если индикатор состояния равен 0, то материал описывается газообразной средой, 1 – упругая среда, 2 – упругопластическая среда, 3 – индикатор разрушения. Таким образом, описать поведение среды можно следующим образом:

$$\sigma_{ij}(\Psi) = \begin{cases} \sigma_{ij}(0) = \sigma_{tr}\delta_{ij}; \\ \sigma_{ij}(1) = s_{ij} + \sigma_{tr}\delta_{ij}, & \text{при этом} \quad \Delta s_{ij} = \Delta s_{ij}^{(e)}; \\ \sigma_{ij}(2) = s_{ij} + \sigma_{tr}\delta_{ij}, & \text{при этом} \quad \Delta s_{ij} = \Delta s_{ij}^{(e)} - 2G\dot{\lambda}s_{ij}; \\ \sigma_{ij}(3) = \sigma_{tr}\delta_{ij}, & \text{при этом} \quad \sigma_{tr} \le 0, \end{cases}$$
(15)

здесь s_{ij} – компоненты девиатора напряжений, $\sigma_{tr} = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3$ – гидростатическое давление, $\Delta s_{ij}^{(e)}$ – приращение упругих компонент девиатора напряжений.

5 Критерии разрушения

5.1 Критерий максимального напряжения

Критерий максимального напряжения рассчитывается как максимальное отношение фактических напряжений к предельным напряжениям σ_{ij}^c , определенным в системе координат материала слоя. Критериальная функция прочности записывается в виде

$$\left(\left| \frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{xx}^c} \right|, \left| \frac{\sigma_{yy}}{\sigma_{yy}^c} \right|, \left| \frac{\sigma_{zz}}{\sigma_{zz}^c} \right|, \left| \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{xy}^c} \right|, \left| \frac{\sigma_{xz}}{\sigma_{xz}^c} \right|, \left| \frac{\sigma_{yz}}{\sigma_{yz}^c} \right| \right)_{\max} \le 1.$$
(16)

5.2 Квадратичный критерий Мизеса — Хилла

Для моделирования разрушения композиционных материалов используется анизотропный квадратичный критерий:

$$\begin{split} F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + H(\sigma_{yy} - \sigma_{xx})^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{zx}^2 + 2N\sigma_{xy}^2 &\leq 1; \\ (17) \\ F &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{(\sigma_{yy}^c)^2} + \frac{1}{(\sigma_{zz}^c)^2} + \frac{xx}{(\sigma_{xx}^c)^2} \right); \qquad G = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{(\sigma_{xx}^c)^2} + \frac{1}{(\sigma_{zz}^c)^2} + \frac{1}{(\sigma_{yy}^c)^2} \right); \\ H &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{(\sigma_{yy}^c)^2} + \frac{1}{(\sigma_{xx}^c)^2} + \frac{1}{(\sigma_{zz}^c)^2} \right); \qquad L = \frac{1}{2(\tau_{yz}^c)^2}; \qquad M = \frac{1}{2(\tau_{zx}^c)^2}; \qquad N = \frac{1}{2(\tau_{xy}^c)^2}, \\ (19) \end{split}$$

здесь τ_{ij} – пороги разрушения при сдвиговом нагружении.

5.3 Временной критерий Тулера — Бутчера

В композитных материалах разрушение при достижении максимального напряжения может привести к разрыву при более низких напряжениях. Процесс разрушения с влиянием временного параметра интерпретируется как интегральный, который задается в определенном структурно-временном диапазоне. Для определения прочности композиционных материалов используют интегральный критерий разрушения Тулера — Бутчера:

$$D = \int_{0}^{t} (\sigma_0 - \sigma(t))^{\lambda} dt.$$
(20)

Здесь $\sigma(t)$ — напряжение разрушения, σ_0 — максимальное главное напряжение, λ — постоянная материала, t — время, когда происходит разрушение, D — другая материальная постоянная, называемая интегралом разрушения.

6 Методика определения термодинамических параметров

Для описания состояния среды при достаточно высокой скорости изменения ее структуры важен учет неравновесности при фазовых переходах или при изменении агрегатного состояния материала. Для вещества, перешедшего в газообразное, жидкое, пластическое или разрушенное состояние, используется "равновесное" уравнение состояния с расчетом фазового равновесия между жидкой и газообразной фазами (Максвелловская конструкция), при этом в твердотельной части образца Максвелловская конструкция не применяется ("неравновесное" уравнение состояния в табличной или аналитической форме):

$$P(\rho, E, \Psi) = \begin{cases} \Psi = 0, \text{ равновесное УРС } E \ge Q_s; \\ \Psi = 1, \text{ неравновесное УРС } E < Q_s \text{ и } \sigma_{ij} < \Sigma_l \text{ и } \sigma_{eq} < Y_0; \\ \Psi = 2, \text{ равновесное УРС } E < Q_s \text{ и } \sigma_{ij} < \Sigma_l \text{ и } \sigma_{eq} = Y_0; \\ \Psi = 3, \text{ равновесное УРС } E < Q_s \text{ и } \sigma_{ij} \in \mathbf{Z}. \end{cases}$$

$$(21)$$

При этом критерий перехода на аналитическое УРС запишем в виде:

$$P(\rho, E, \Psi) = \begin{cases} \Psi = 0, & \text{табличное УРС} \quad E \ge Q_s; \\ \Psi = 1, 2, 3, & \text{аналитическое УРС} \quad E < Q_s. \end{cases}$$
(22)

Предложенная методика согласованного решения задач гидродинамики и упругопластики реализована на языке программирования C++ с использованием библиотеки OpenMPI в виде предметно-ориентированной версии кода, включенного в состав вычислительной платформы MARPLE (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН) [8].

7 Моделирование воздействия концентрированных потоков энергии на конденсированное вещество

Рассмотрим применение описанной выше методики к моделированию экспериментов по испытанию материалов на сильноточном электронном ускорителе «Кальмар» в НИЦ Курчатовский Институт [1]. Используя сфокусированные импульсные сильноточные релятивистские электронные пучки (РЭП), можно за наносекундные времена вложить в конденсированное вещество энергию с высокой плотностью потока мощности $10^9 - 10^{10}$ Дж/(см²·с). Такой способ ввода энергии используется, в частности, в экспериментальных исследованиях в современном материаловедении, в том числе и при создании новых конструкционных материалов на основе полимеров и композитов со сложной структурой. В результате действия ионизирующего излучения происходит нагревание и испарение части материала, на неиспаренную часть образца действует импульс отдачи, инициирующий волновые процессы, которые могут привести к разрушению образца.

7.1 Воздействие РЭП на эпоксидную смолу

Образец из эпоксидной смолы, на который воздействует РЭП, представляет собой цилиндр диаметром 35 мм и высотой 20 мм. Флюенс энергии 600 Дж/см², время воздействия 0.1 мкс, время расчета 5 мкс. Импульс отдачи летящего испаренного материала непосредственно учитывался в сквозном расчете напряженно-деформированного состояния в неиспарившемся остатке образца. На рис. 1 – 3 представлены результаты моделирования. На рис. 4 показаны значения фазовой переменной Ψ , соответствующие состоянию образца на рис. 1 и 2. $\Psi = 1$ (синий) — упругопластическая область неразрушенного материала, здесь используется неравновесное табличное УРС-11 и учитывается девиатор напряжений. $\Psi = 3$ (серый) — разрушенная область, здесь используется равновесное табличное УРС-11 и учитывается только гидростатическое давление, области объемного разрушения работают исключительно на сжатие. $\Psi = 0$ (красный) — газодинамическая область: испаренный материал и фоновая разреженная среда (модельный лабораторный вакуум), используется табличное УРС-11 с Максвелловской конструкцией, учитывается только гидростатическое давление. На рис. 5 показаны характерные области разрушения материала: испаренная каверна, внутреннее объемное разрушение

и тыльный откол, наблюдаемые в эксперименте и выявленные в результате расчета с использованием критериев разрушения, описанных в разделе 4.



Рис. 1: Волновой процесс во всей расчетной области, включая разрушенный образец. Слева — распределение скорости (см/мкс), справа — поле температуры (кэВ).



Рис. 2: Волновой процесс во всей расчетной области, включая разрушенный образец. Слева — распределение компоненты D_{zz} девиатора напряжений (Мбар), справа — векторное поле главных напряжений (Мбар).



Рис. 3: Интенсивность напряжений (Мбар) в разрушенном образце на момент времени t = 5.2 мкс.

Рис. 4: Переменная агрегатного состояния: синий — упругопластическая область неразрушенного материала, серый — упругопластическая область разрушенного материала, красный — газодинамическая область (испаренный материал и вакуум).

Рис. 5: Результаты моделирования и фотография образца после облучения.

7.2 Воздействие ионизирующего излучения на гетерогенный материал

Объектом исследования является преграда из гетерогенного материала с дисперсным наполнителем, размещенная на подложке из алюминия. Схема проведения численных исследований и размеры показаны на рисунке 6. Дисперсный наполнитель из SnO₂ имеет сферическую форму диаметром d = 300 мкм. Содержание дисперсного наполнителя в гетерогенном модельном материале – 20% по весу. Распределение наполнителя стохастическое, по объему связующего из эпоксидной смолы. Объект окружен вакуумом с фронтальной и тыльной стороны. Флюенс энергии ионизирующего излучения (ИИ) 210 Дж/см², время воздействия 0.01 мкс, время расчета 0.5 мкс.

Рис. 6: Схема эксперимента и модель гетерогенного материала. Результаты моделирования и их обсуждение приведены далее на рис. 7-13.

Рис. 7: Распределение плотности (г/см³), t = 0.3 мкс. В результате воздействия ионизирующего излучения происходит абляция материала. Стохастически распределенный наполнитель поглощает больше энергии, чем при структурированном размещении дисперсного наполнителя.

Рис. 8: Распределение плотности (г/см $^3)$ в логарифмическом масштабе, t = 0.3 мкс.

Рис. 9: Разрушение образца, t = 0.3 мкс. Разрушение образца происходит в еще неиспаренном дисперсном наполнителе и в подложке там, где поглотилось больше энергии из-за стохастического размещения дисперсного наполнителя.

Рис. 10: Распределение давления (Мбар), t = 0.3 мкс. При абляции материала возникают реактивные силы, которые формируют импульс отдачи. На момент времени 0.3 мкс акустическая волна распространяется в подложке.

Рис. 11: Интенсивность деформаций, t = 0.3 мкс. В сублимированном дисперсном наполнителе возникают деформации, приводящие к частичному разрушению наполнителя до момента абляции.

Рис. 12: Интенсивность напряжений (Мбар), t = 0.3 мкс. Концентрация напряжений происходит в дисперсном наполнителе, в его приповерхностных слоях, где поглощается больше энергии.

Рис. 13: Распределение скорости (см/мкс), t = 0.3 мкс.

8 Заключение

Построена комплексная компьютерная модель термомеханических явлений в твердом деформируемом материале в результате действия интенсивных потоков энергии. Разработан алгоритм сквозного расчета нагрева, испарения, динамики испаренного вещества и упругопластических волновых процессов, приводящих к разрушениям в неиспаренном твердом материале. Предложена методика динамического контроля изменения агрегатного состояния конденсированной среды с выбором соответствующего УРС и формы учета тензора напряжений. Предложенная методика согласованного решения задач гидродинамики и упругопластики реализована на языке программирования C++ с использованием библиотеки OpenMPI в виде предметно-ориентированной версии кода, включенного в состав вычислительной платформы MARPLE (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН). Проведены расчеты разрушения полимерных и композитных материалов под действием ионизирующих излучений, получены оценки прочностных характеристик материалов.

Созданное программное обеспечение может быть использовано при анализе результатов интенсивных энергетических воздействий в инженерной практике, верификации моделей объёмных разрушений и отколов в хрупких материалах, а также валидации широкодиапазонных уравнений состояния.

Библиографический список

- Gurevich, M. I., Kazakov, E. D., Kalinin, Yu. G., Kurilo, A. A., Tel'kovskaya, O. V., and Chukbar K. V. On the Destruction of Elastic Polymers under Electron Beam Irradiation In *Technical Physics*, Vol. 67, No. 7, pp. 581–587, 2022.
- [2] Новиков В. Г., Соломянная А. Д., Вичев И. Ю., Грушин А. С. СВИ-ДЕТЕЛЬСТВО о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013616315 THERMOS: Библиотека функций для расчета радиационных и термодинамических свойств различных веществ и смесей в широкой области температур и плотностей. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, 2013 г.

- [3] Никифоров А. Ф., Новиков В. Г., Уваров В. Б. Квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы. *Физматлит*, 2000.
- [4] More, R. M., Warren, K. H., Young, D. A. and Zimmerman G. B. A new quotidian equation of state (QEOS) for hot dense matter. *The Physics of Fluids*, 31, 1988.
- [5] Faik, S., Tauschwitz, A., Iosilevskiy I. The equation of state package FEOS for high energy density matter *Computer Physics Communications*. 227, 117-125, 2018.
- [6] Сапожников А. Т., Першина А. В. Интерполяционное уравнение состояния в области испарения. Вопросы атомной науки и техники. 2(16), 29-34, 1984.
- [7] Грибанов В. М., Острик А. В., Ромадинова Е. А. Численный код для расчета многократного комплексного действия излучений и частиц на многослойный многофункциональный гетерогенный плоский пакет (код «ММНРР-1»). Черноголовка: ИПХФ РАН, 2006.
- [8] Gasilov, V. A., Boldarev, A. S., Olkhovskaya, O. G., Boykov, D. S., Sharova, Yu. S., Savenko, N. O., Kotelnikov, A. M. MARPLE: software for multiphysics modelling in continuous media. *Numerical Methods and Programming*. 24(4), 316–338, 2023.

Оглавление

1	Введение	3
2	Математическая модель газодинамических и упругопласти- ческих волновых процессов	3
3	Уравнения состояния	5
4	Динамический контроль состояния материала	7
5	Критерии разрушения 5.1 Критерий максимального напряжения	8 8 9
6	Методика определения термодинамических параметров	9
7	Моделирование воздействия концентрированных потоков энергии на конденсированное вещество 7.1 Воздействие РЭП на эпоксидную смолу 7.2 Воздействие ионизирующего излучения на гетерогенный материал	10 10 13
8	Заключение	16
Б	иблиографический список	16