

УДК 532.533.6

СПОСОБ ПРОВЕДЕНИЯ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ТВЕРДОГО ТЕЛА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Бутина Т.А.

кандидат физико-математических наук, доцент

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

(национальный исследовательский университет)

Москва, Россия

Семенов К.С.

специалист в области управления сложными техническими системами,

инженер 1 категории

Ракетно-космическая корпорация "Энергия", Центр Управления Полетами

Москва, Россия

Аннотация

Кратковременные воздействия на современные многослойные конструкции приводит к возникновению и распространению в них ударных волн. В результате происходит резкое изменение напряженно-деформированного состояния, нагрев материалов конструкции. Перераспределение напряжений и деформаций в многослойных конструкциях носит сложный характер. При этом из-за отражения ударных волн от граничных слоев могут возникать значительные растягивающие напряжения, что часто приводит к расслоению материалов, отколам и в итоге к нарушению работоспособности конструкции. При решении этой сложной задачи установления целостности и работоспособности конструкции важным является вопрос оценки давления и температуры на ударной адиабате.

Ключевые слова: Ударная адиабата, потенциальное давление, температура, упругая энергия, удельный объем, коэффициент Грюнайзена, остаточная температура, работоспособность конструкции.

METHOD FOR ASSESSING THE POTENTIAL PRESSURE AND TEMPERATURE OF A SOLID BODY UNDER PULSED LOADING

Butina T.A.

Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

Semenov K.S.

Specialist in the management of complex technical systems, 1st category engineer

Rocket and Space Corporation "Energia", The Mission Control Center

Moscow, Russia

Annotation

Short-term impacts on modern multilayer structures lead to the generation and propagation of shock waves within them. As a result, there is a sharp change in the stress-strain state and heating of the structural materials. The redistribution of stresses and deformations in multilayer structures is complex. Due to the reflection of shock waves from the boundary layers, significant tensile stresses may arise, which often leads to material delamination, chipping, and ultimately to a failure of the structure's functionality. When solving this complex problem of establishing the integrity and operability of the structure, an important issue is the assessment of pressure and temperature along the shock adiabat.

Keywords: Shock adiabat, potential pressure, temperature, elastic energy, specific volume, Gruneisen coefficient, residual temperature, structural performance.

Введение

Одной из важных практических задач является получение изменения температуры твердого тела, сжатого ударной волной. Для ее определения необходимо наличие зависимости потенциального (упругого) давления P_y от удельного объема ϑ . Получение этих зависимостей в полной мере требует применения теоретических методов физики высоких давлений, уравнений состояния твердых тел с учетом электронных компонент, определяемых в сложных динамических экспериментах.

Предлагаемые методы [6, 7, 8] несомненно имеют большое практическое и теоретическое значение. Однако, в их основе лежит постулирование конкретных видов потенциалов взаимодействия атомов, а значения используемых коэффициентов определяются в дорогостоящих экспериментах и в основном для металлов [2, 9]. В этой связи далеко не всегда возможно их использование в практических расчетах, связанных с сохранением работоспособности многослойных конструкций, подверженных ударному нагружению.

Поскольку сжатие современных конструкций сильными ударными волнами представляет большой практический интерес, необходимо проведение оценок P_y , использующих доступные экспериментальные данные. Ниже предлагается способ оценки величин потенциального давления и температуры на ударной адиабате.

Цель и задачи исследования

Для получения предлагаемой зависимости $P_y(\vartheta)$ было использовано часто применяемое в расчетах приближение $\gamma\rho = \gamma_0\rho_0$, здесь γ_0, ρ_0 значения коэффициента Грюнайзена и плотности вещества при нормальных условиях, γ, ρ – соответственно их текущие значения. Скорость ударного фронта C и массовая скорость сжатого ударной волной вещества u связаны зависимостью $C = \alpha + \beta u$, где α, β – коэффициенты. В практически важном диапазоне умеренных давлений, при которых идет речь о сохранении надежности и работоспособности конструкции, эти соотношения являются достаточно точными. В таком диапазоне давлений проведена оценка температуры сжатого вещества и в качестве уравнения состояния было выбрано уравнение Ми-Грюнайзена:

$$P = P_y(\vartheta) + \gamma\rho(E - E_y), \quad (1)$$

где E_y, P_y – потенциальные составляющие энергии и давления, E, P – полные давление и энергия.

На фронте ударной волны это уравнение имеет вид

$$P_H(\mu) - P_y(\mu) = \gamma_0[E_H(\mu) - E_y(\mu)], \quad (2)$$

где E_H, P_H – энергия и давление на ударной адиабате, $\mu = 1 - \rho_0/\rho$.

После подстановки в выражение (2) E_H из уравнения Ренкина-Гюгонио согласно [9], с использованием соотношения $\sigma = -P + S$ (здесь σ – полное напряжение, S – сдвиговые напряжения), после дифференцирования получим следующее уравнение:

$$\frac{dP_y}{d\mu} - \gamma_0 P_y = \frac{dP_H}{d\mu} - \frac{\gamma_0}{2} \left[\frac{dP_y}{d\mu} (\mu - \mu_e) - P_H - P_e + 2S_e \right] \quad (3)$$

С индексом e имеем параметры, соответствующие упругой волне, на которой достигнут предел текучести. Полученное уравнение описывает зависимость $P_y(\mu)$ для $\mu > \mu_e$. Оценки членов уравнения показали правомочность применения соотношений на всем диапазоне давлений. Не теряя точности расчетов в правой части уравнения (3) можно отбросить члены $2S_e$, P_e , $\frac{dP_H}{d\mu}\mu_e$ и уравнение примет вид:

$$\frac{dP_y}{d\mu} - \gamma_0 P_y = \frac{dP_H}{d\mu} - \frac{\gamma_0}{2} \left(\frac{dP_H}{d\mu} \mu + P_H \right) \quad (4)$$

Начальными условиями берутся: $P_y|(\mu=0)$ берется равным P_0 , где P_0 – потенциальное давление при нормальных условиях.

Решение (4) искалось в виде:

$$P_y = P_e \exp(\gamma_0 \mu) - \Phi + P_H \quad (5)$$

В качестве функции Φ положено:

$$\Phi = M(\mu) + \mu_0 \left(\frac{P_H(\mu)}{2} - \int_0^\mu P_H d\mu \right) \quad (6)$$

После подстановки выражения (6) в формулу (5) было получено уравнение относительно $M(\mu)$:

$$\frac{dM(\mu)}{d\mu} - \gamma_0 M(\mu) = \gamma_0^2 K(\mu), \quad (7)$$

M при $\mu = 0$ имеет нулевое значение, $K(\mu) = \frac{P_H}{2} \mu - \int_0^\mu P_H(\mu) d\mu$.

Если принять $P_h = \rho_0 \alpha^2 \mu / (1 - \beta \mu)^2$ [7], то получаем:

$$K(\mu) = \rho \alpha^2 \left(\frac{\mu^2}{2(1-\beta\mu)^2} - \frac{\mu}{\beta(1-\beta\mu)} - \frac{\ln(1-\mu)}{\beta^2} \right) \quad (8)$$

Таким образом, получено выражение для функции $M(\mu)$, являющееся решением уравнения (7):

$$M(\mu) = \gamma_0^2 \exp(\gamma_0 \mu) \int_0^H \exp(-\gamma_0 \mu) K(\mu) d\mu$$

После интегрирования с использованием формулы Симпсона имеем:

$$M(\mu) = \gamma_0^2 \mu \left[\frac{2}{3} \exp\left(\frac{\gamma_0}{2}\right) K(\mu/2) + \frac{1}{6} K(\mu) \right] \quad (9)$$

В итоге получено уравнение для упругого давления

$$P_Y = P_0 \exp(\gamma_0 \mu) + P_H - \gamma_0 K(\mu) - M(\mu), \quad (10)$$

где выражения для функций $M(\mu)$, $K(\mu)$ даются формулами (8,9).

Известно, что полное давление состоит из потенциального и теплового [6,7]

$$P = P_y + \gamma_0 (E - E_y) = P_Y + \gamma_0 \rho_0 c_v T$$

$$P = P_0 \exp(\gamma_0 \mu) + \bar{P} + \gamma_0 \rho_0 c_v T \quad (11)$$

Здесь T – абсолютная температура, c_v – теплоемкость, $\bar{P} = P_H - \gamma_0 K - M$.

Поскольку при нормальных условиях $P = 0$, $\mu = 0$, $\bar{P} = 0$, то, следовательно:

$$P_0 = -\rho_0 \gamma_0 c_v T \text{ и } E_Y = -c_v \rho_0 T \quad (12)$$

С использованием этих соотношений можно перейти к уравнению состояния, где все параметры отсчитываются от нуля.

$$P = P_0 \exp(\gamma_0 \mu) + \bar{P} - P_0 + \gamma_0 (\bar{E} - \bar{E}_y) = P_y - P_0 + \rho_0 \gamma_0 c_v t, \quad (13)$$

где $\bar{E}$, $\bar{E}_y$, t – полная внутренняя, потенциальная энергии, температура.

Из последних уравнений получены оценки температуры за фронтом ударной волны:

$$t = \frac{P - \bar{P}}{\rho_0 \gamma_0 c_v} + T[\exp(\gamma_0 \mu) - 1] \quad (14)$$

Для получения остаточной температуры бралась сумма приращений температуры, которая достигается при прохождении ударной волны сжатия и температуры, получающейся после разгрузки. Имеем следующее соотношение

$$\Delta T_{\text{ост}} \cong \frac{\Delta \rho - \Delta \bar{P}}{\rho_0 \gamma_0 c_v} \quad (15)$$

Результаты расчетов

Полученные выше соотношения позволили рассчитать давление и температуру на фронте ударной волны, а также остаточную температуру для ряда материалов, в том числе и композитных [3,4]. Эти результаты приведены в таблицах. Полученные результаты сравнивались с результатами тех же величин, полученных другими способами [1,2,5,6,8]. Сравнение показало, что в диапазоне умеренных давлений, при которых рассматривается целостность и работоспособность конструкции, совпадение достаточно хорошее.

Выводы

Полученный способ дает возможность проводить оценки давления и температуры на ударной адиабате, остаточной температуры в практически важном диапазоне умеренных давлений. Указанные параметры определяются для различных конструкционных материалов с достаточной точностью.

Изложенный подход прост и доступен, требует минимального числа известных экспериментальных данных.

Таблица 1

ϑ	P_y , ГПа	T_H , °C	$T_{ост}$, °C	P_y , ГПа	T_H , °C	$T_{ост}$, °C	P_y , ГПа	T_H , °C	$T_{ост}$, °C
	<i>Fe</i>			<i>Cu</i>			<i>Ti</i>		
0,98	0,71	0,9	0,13	0,74	12	0,16	1,3	7	0,12
0,96	3,4	19	1,9	3,98	26	1,4	3,6	10	1
0,94	6,49	32	4	7,65	43	5	6,1	25	7
0,92	9,99	49	10	11,6	64	12	8,9	54	9
0,90	13,99	71	23	16,4	93	26	11,9	65	18
0,88	18,5	102	42	21,8	131	49	15	78	34
0,86	23,8	144	74	27,8	181	85	18,8	109	57
0,84	29,8	201	120	34,7	250	136	22	150	90
0,82	36,7	280	187	42,5	341	211	27	204	138
0,80	44,8	387	281	51,4	462	315	31,7	273	195
0,78	54,2	531	414	61,7	623	457	36	360	275
0,76	65,1	726	596	73,6	813	651	42	473	378
0,74	78,0	988	845	87	1117	912	48	610	510
0,72	93,3	1340	1184	103	1487	1262	55	809	677
0,70	123	2116	1645	122	1976	1729	63	1011	888
	<i>Полистирол</i>			<i>Сталь</i>					
0,98	0,01	3	0,01	1,76	9	0,18			
0,96	0,047	7	0,16	5,6	20	1,5			
0,94	0,21	11	0,57	9,93	33	5,7			
0,92	0,41	16	1,4	14,82	52	14			
0,90	0,62	21	3	20,35	78	30			
0,88	0,86	28	5,6	26,61	115	56			
0,86	1,14	35	9	33,71	166	96			
0,84	1,45	45	15	41,78	236	155			
0,82	1,79	57	23	50,99	333	240			
0,80	2,19	73	35	61,52	463	358			
0,78	2,64	93	50	73,62	638	521			
0,76	3,16	118	71	87,57	872	742			
0,74	3,7	150	99	103,7	1182	1039			
0,72	4,45	191	136	122,5	1594	1438			
0,70	5,22	244	185	144,64	2140	1970			

Библиографический список

1. Абашкин Б.И. Измерение теплового давления в веществе, нагретом излучением оптического квантового генератора / Б.И. Абашкин, А.А. Калмыков, Ю.Е. Плешаков – ПМТФ, 1987. - №5 – С. 107-111.
2. Высокоскоростные ударные явления – М.: Мир, 1973. – 433 с.
3. Димитриенко Ю.И. Нелинейная механика сплошной среды – М.: Физматгиз, 2005. – 624 с.
4. Димитриенко Ю.И. Разработка численного метода расчета эффективных упругих характеристик композиционных материалов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. - №2 – С. 50-57.
5. Долгов А.А. Об оценке температуры на адиабате Гюгонио с помощью правила зеркального отражения / А.А. Долгов, М.Ю. Мессинев. – ПМТФ, 1989. - №5 – С. 20-25.
6. Жарков В.Н. Уравнения состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах / В.Н. Жарков, В.А. Калинин. – М.: Наука, 1960. – 350 с.
7. Зельдович Я.Б. Физика ударных волн и высокотемпературных явлений / Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. – Физматгиз, 1966. – 565 с.
8. Ионов В.Н. Напряжения в твердых телах при импульсном нагружении / В.Н. Ионов, П.М. Огибалов. – М.: Высшая школа, 1995 – 275 с.
9. Станюкович К.П. Физика взрыва. – М.: Физматгиз, 1978. – 704 с.