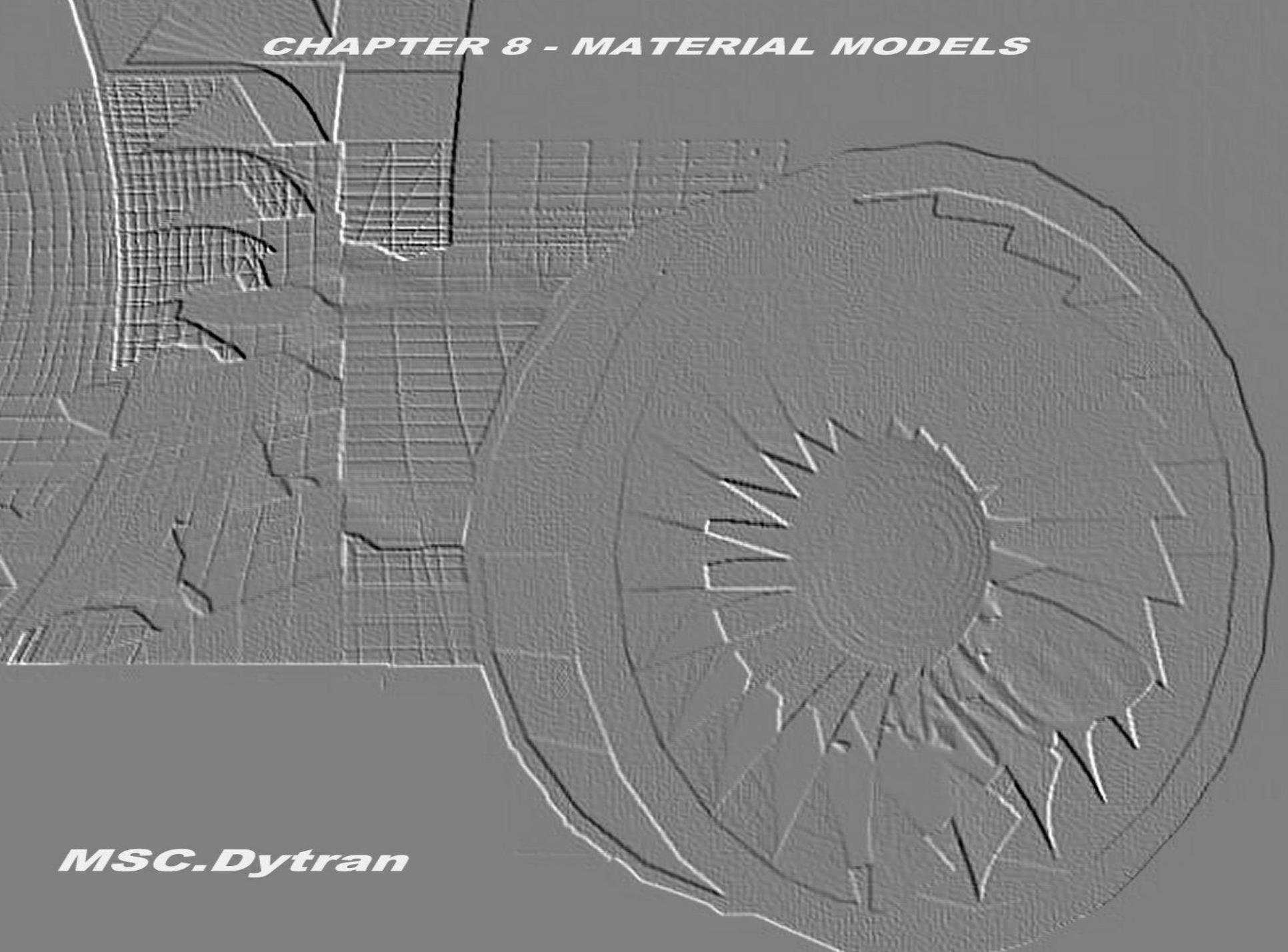


CHAPTER 8 - MATERIAL MODELS



MSC.Dytran

СОДЕРЖАНИЕ

- Задание (описание) материалов**
- Уравнение состояния**
- Модели сдвиговых свойств**
- Модели текучести (предельного состояния)**
- Модель нарушения сплошности материала (модель “разрыва”)**
- Модели разрушения**

“ТИПЫ” МАТЕРИАЛОВ

- ❑ Операторы задания *лагранжевых* элементов ссылаются на операторы описания *свойств*, которые “переадресуют” ссылку на оператор описания *материалов*

CQUAD4,71,100,1,2,3,4

PSHELL,100,300,0.1

DMATER,300,7852.,210.E9,0.3

- ❑ Доступны следующие модели материалов:

- DMAT – “обобщённая” модель материала
 - ✓ Материал с комплексным заданием всех свойств, включая текучесть, разрушение, нарушение сплошности (разрыв)
 - ✓ Может использоваться для описания только объёмных элементов
- MAT1 – упругий (эластичный) материал
 - ✓ Линейно-упругий материал для моделирования балок и оболочек
- DMATEL – упругий (эластичный) материал
 - ✓ Линейно-упругий материал для моделирования мембран и объёмных тел
- DMATER – упруго-пластичный материал с разрушением
 - ✓ Линейно упругий и линейно-пластичный материал для моделирования балок и оболочек

“ТИПЫ” МАТЕРИАЛОВ

- **MAT8 + MAT8A** – ортотропные материалы, в том числе с разрушением
 - ✓ Ортотропные материалы для моделирования оболочек (включая композитные)
- **SHEETMAT** – анизотропный упруго-пластичный материал с разрушением для оболочек
 - ✓ Используется для моделирования конструкций из металлического листа, полученного прокаткой. Модель разработана проф. Раймондом Крейгом (Raymond Krieg)
- **DMATOR** – ортотропный линейно-упругий материал с разрушением
 - ✓ Ортотропный материал для моделирования объёмных элементов (в том числе из композиционных материалов)
- **DYMAT14** – материал для моделирования грунтов и вспененных материалов
 - ✓ Нелинейный материал с возможностью большого объёмного сжатия и упруго-пластический при деформациях сдвига
- **DYMAT24** – упруго-пластический материал с разрушением
 - ✓ Нелинейный упруго-пластический материал с изотропным упрочнением и кусочно-линейной зависимостью напряжения от деформации. Применяется для моделирования оболочек, балок и для лагранжевых объёмных элементов

“ТИПЫ” МАТЕРИАЛОВ

- **DYMAT25 – модель материала со специальной зависимостью кинематического упрочнения**
 - ✓ Материал может использоваться для моделирования структур из камня, бетона и грунта
- **DYMAT26 – ортотропный материал с возможностью большого объёмного сжатия**
 - ✓ Материал может использоваться только для *лагранжевых* объёмных элементов
- **RUBBER1 – резиноподобный материал**
 - ✓ Почти несжимаемый гиперэластичный материал. Может применяться только для лагранжевых объёмных элементов
- **FOAM1 – изотропный материал с возможностью большого сжатия**
 - ✓ Материал с нулевым значением коэффициента Пуассона
- **FOAM2 – изотропный “пенноподобный” материал с гистерезисом**
 - ✓ Форма “петли” материала задаётся пользователем, а коэффициент Пуассона имеет нулевое значение

“ПРИМЕНИМОСТЬ” МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

- ❑ **Балки**
 - MAT1 – упругий (эластичный) материал
 - DMATER - упруго-пластичный материал с разрушением
 - DYMAT24 - упруго-пластический материал с разрушением
- ❑ **Оболочки**
 - MAT1 – упругий (эластичный) материал
 - DMATER – упруго-пластичный материал с разрушением
 - MAT8 и MAT8A – ортотропные материалы, в том числе с разрушением
 - SHEETMAT – анизотропный упруго-пластичный материал
 - DYMAT24 – упруго-пластический материал с разрушением
- ❑ **Мембраны**
 - DMATEL - упругий (эластичный) материал

“ПРИМЕНИМОСТЬ” МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

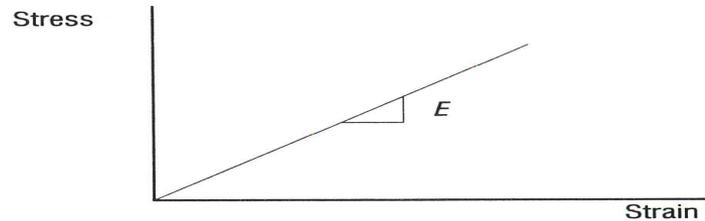
□ Объёмные элементы

- DMAT – “обобщённая” модель материала
- DMATEL - упругий (эластичный) материал
- DMATOR - ортотропный линейно-упругий материал с разрушением
- DYMAT14 -материал для моделирования грунтов и вспененных материалов
- DYMAT24 - упруго-пластический материал с разрушением
- DYMAT25 - модель материала со специальной зависимостью кинематического упрочнения
- DYMAT26 - ортотропный материал с возможностью большого объёмного сжатия
- RUBBER1 - резиноподобный материал
- FOAM1 - изотропный материал с возможностью большого сжатия
- FOAM2 - изотропный “пенноподобный” материал с гистерезисом

ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА **MAT1**

- ❑ Упругий (эластичный) материал
- ❑ Применим для моделирования оболочек и балок
- ❑ Пример:

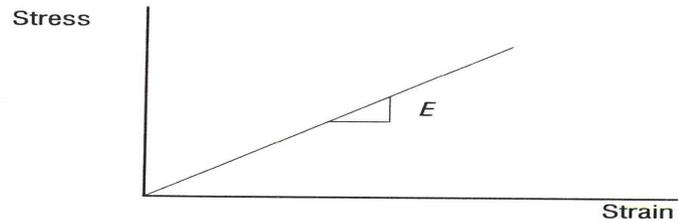
1	2	3	4	5	6
MAT1	MID	E	G	NU	RHO
MAT1	17	3.+7		0.33	4.28



ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА **DMATEL**

- ❑ Упругий (эластичный) материал
- ❑ Применим для моделирования мембран и лагранжевых объёмных элементов
- ❑ Пример:

1	2	3	4	5	6	7
DMATEL	MID	RHO	E	NU	G	K
DMATEL	11	7850.0	210.E9	0.3		

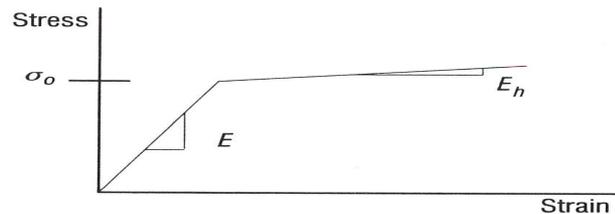


ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА **DMATEP**

- ❑ Упруго-пластичный материал с разрушением
- ❑ Применим для моделирования балок и оболочек
- ❑ Пример:

Номер оператора, описывающего модель текучести

1	2	3	4	5	6	7	8	9
DMATEP	MID	RHO	E	Nu	G	K	YID	FID
DMATEP	11	7850.0	210.E9	0.3			100	101



Номер оператора, описывающего модель разрушения

ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ **MAT8** И **MAT8A**

- ❑ Линейно упругий ортотропный материал (MAT8A - с разрушением)
- ❑ Применим для моделирования композиционных материалов
- ❑ Применим только для оболочек
- ❑ Пример:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MAT8	MID	E1	E2	N12	G12	G1,Z	G2,Z	RHO	
MAT8	171	30.+6	1.+6	0.3	2.+6	3.+6	1.5+6	0.056	

- Модели разрушения (для материала MAT8A):
 - ✓ Модель Tsai-Hill
 - ✓ Модель Tsai-Wu
 - ✓ Модифицированная модель Tsai-Wu
 - ✓ Модель “максимума напряжения”
 - ✓ Модель Chang-Chang
 - ✓ Модель пользователя

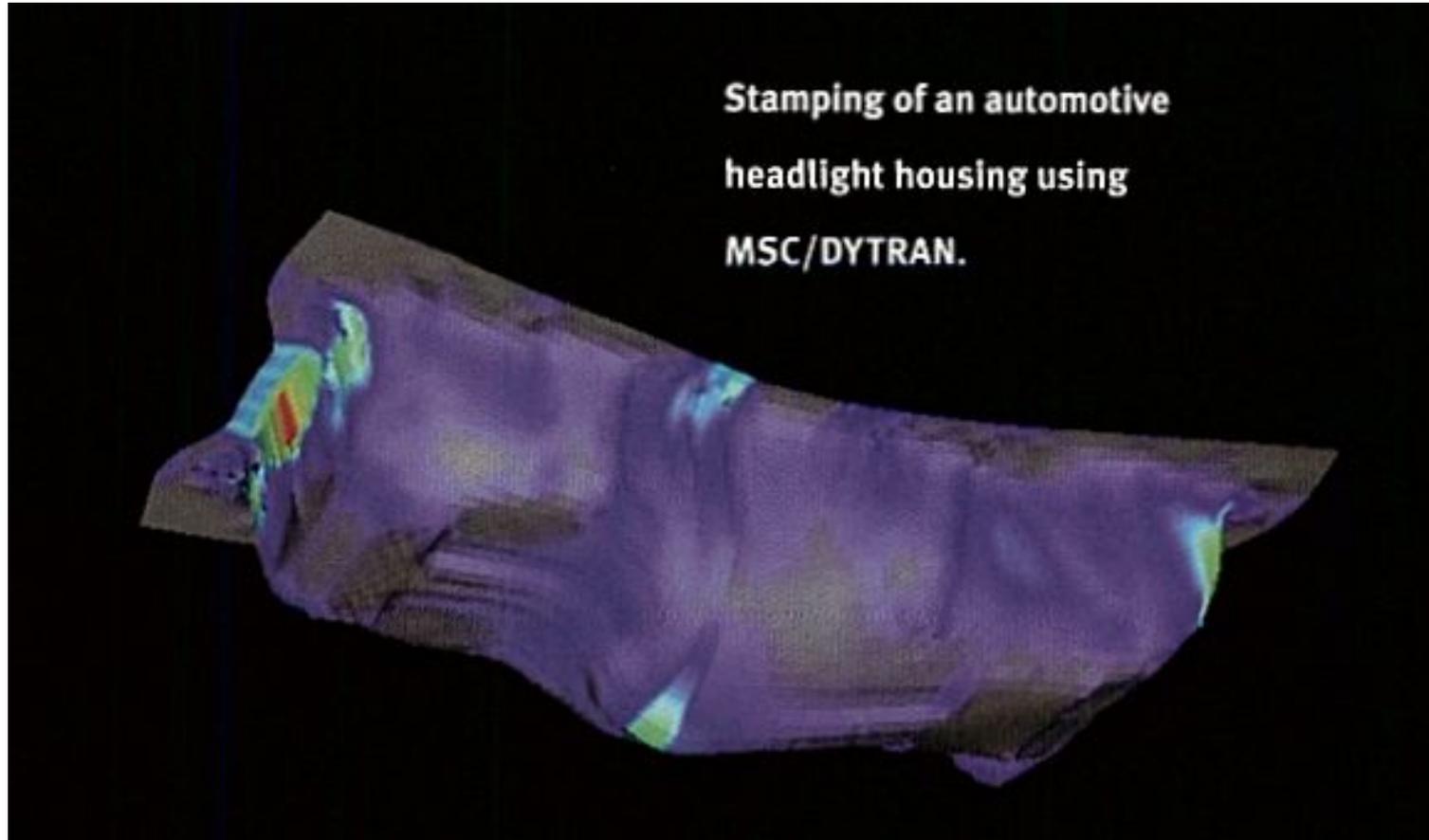
ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА SHEETMAT

- ❑ Ортоотропный упруго-пластичный материал с разрушением
- ❑ Применяется для моделирования конструкций из металлического листа, полученного прокаткой
- ❑ Разработан проф. Раймондом Крейгом (Raymond Krieg) из университета штата Теннесси (США)
- ❑ Применим только для оболочек

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SHEETMAT	MID	RHO	EXX	EYY	EZZ	GXY	GYZ	GXZ	+CONT1
SHEETMAT	1	2.7E-6	72E6						+CONT1
+CONT1	NUXY	NUYZ	NUXZ	ELASTIC		XMAT	YMAT	ZMAT	+CONT2
+CONT1	0.33			ISO		1.0	0.0	0.0	+CONT2
+CONT2	a	b	c	n	k	m			+CONT3
+CONT2	0.0	570E3	0.017	0.359	0.014	0.389			+CONT3
+CONT3	TYPEYLD	R0	R45	R90					+CONT4
+CONT3	PLANANI	0.73	0.51	0.69					+CONT4
+CONT4	TYPEHRD								+CONT5
+CONT4	ISO								+CONT5
+CONT5	C1	C2	C3	C4	C5				+CONT6
+CONT5	0.244	-0.195	0.857	3.439	-11.92				+CONT6
+CONT6		D2	D3	D4	D5				
+CONT6		-0.417	-1.567	-4.849	-6.061				

Вектор, определяющий направление прокатки металлического листа

ПРИМЕР: МОДЕЛИРОВАНИЕ ШТАМПОВКИ КОРПУСА АВТОМОБИЛЬНОЙ ФАРЫ С ПОМОЩЬЮ MSC.Dytran



ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА **DMAT**

❑ “Обобщённая” модель материала, для описания которой используются:

- Уравнение состояния (операторы EOSxx)
- Модель сдвиговых свойств (операторы SHRxx)
- Модель текучести (операторы YLDxx)
- Модель нарушения сплошности (операторы PMINxx)
- Модель разрушения (операторы FAILxx)

❑ Применим только для объёмных элементов

❑ Пример:

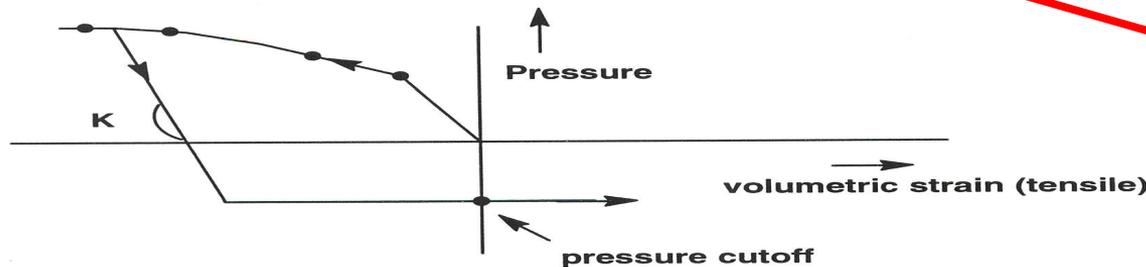
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DMAT	MID	RHO	EID	SID	YID	FID	PID	CID	+CCNT1
DMAT	22	3000.	100	109	307	308	402		+CCNT1



ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА **ДУМАТ14**

- ❑ **Материал для моделирования грунтов и вспененных материалов**
- ❑ **Применим только для лагранжевых объёмных элементов**
- ❑ **Пример:**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DYMAT14	MID	RHO	G	K	TABLE	TYPE	VALUE	CUTOFF	
DYMAT14	3	0.01.	5.	3.	111	CRUSH	-100.	PFRAC	+
	Ao	A1	A2	YIELD	POISSON				
+	1.	0.	0.	YSURF	FREE				+
	HGTYPE	HGCOEFF	BULKTYPE	BULKQ	BULKL				
+	FBV2	0.11	DYNA	1.4	0.05				



Тип поверхности предельного состояния

$$\begin{aligned}
 \text{YSURF} & : \sigma_y = \sqrt{3 (A_0 + A_1 p + A_2 p^2)} \\
 \text{YSTRESS} & : \sigma_y = \text{MIN} (A_0 + A_1 p, A_2)
 \end{aligned}$$

Величина “pressure cutoff” зависит от типа поверхности предельного состояния

ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА **ДУМАТ24**

- ❑ **Нелинейный упруго-пластический материал с изотропным упрочнением и кусочно-линейной зависимостью напряжения от деформации**
- ❑ **Возможно моделирование разрушения**
- ❑ **Применим для моделирования балок, оболочек, для объёмных элементов**
- ❑ **Пример:**

Таблица $\sigma=f(\epsilon)$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DYMAT24	MID	RHO	E	NU	TABLE	TYPE	TABY		+CONT1
DYMAT24	17	7850.	210.E9	0.3	39	ENG			+CONT1
+CONT1	YIELD	EH	EPSF	D	P				+CONT2
+CONT1			0.37	40.5	5				+CONT2
+CONT2			BULKTYP	BULKQ	BULKL				
+CONT2			DYNA	1.4	0.05				

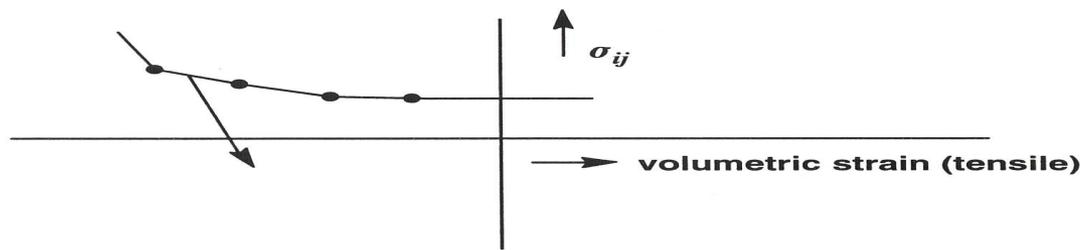
ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА **ДУМАТ26**

- ❑ Ортотропный материал с возможностью большого объёмного сжатия
- ❑ Применим только для *лагранжевых* объёмных элементов

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DYMAT26	MID	RHO	E	NU	YIELD	RELV	TYPE	OPTIO	
DYMAT26	5	1800.	180.e9	0.3	180.e6	0.1	CRUSH	VECT	
	TIDXX	TIDYY	TIDZZ	TIDXY	TIDYZ	TIDZX	TIDSR		
+	10	11	12	13	14	15	16		+
	EXX	EYY	EZZ	GXY	GYZ	GZX			
+	60.e9	70.e9	60.e9	20.e9	10.e9	20.e9			+
	NUYX	NUZX	NUZY						
+	0.0	0.0	0.0						+
	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2			
+	0.	0.	1.	1.	1.	0.			+
			BULK TYP	BULK Q	BULK L				
+			DYNA	1.4	0.05				

Характеристики "скомпактированного" материала

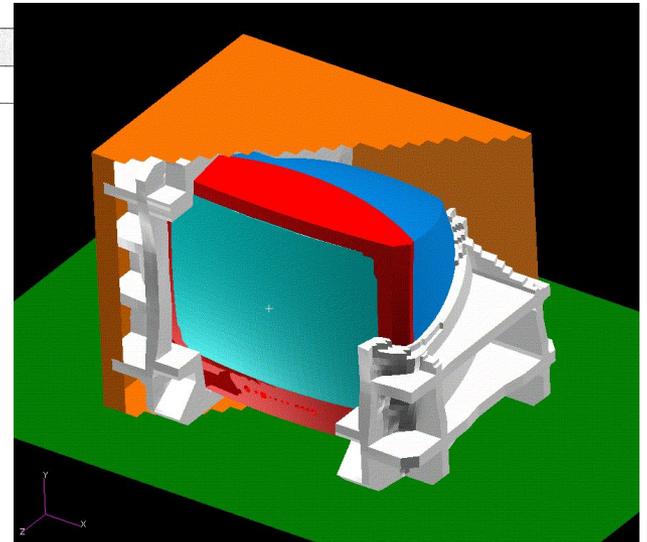
Характеристики материала во "вспененном" состоянии



ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА **FOAM1**

- ❑ Изотропный материал с возможностью большого сжатия и нулевым значением коэффициента Пуассона. Подходит для моделирования полипропилена
- ❑ Пригоден только для *лагранжевых* объёмных элементов
- ❑ Пример: задаётся модуль сдвига (**G**) или объёмный модуль (**K**)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FOAM1	MID	RHO	G	K	TABLE	TYPE			+CONT1
FOAM1	3	0.01		3.	111	CRUSH			+CONT1
+CONT1			BULK TYP	BULK Q	BULK L				
+CONT1			DYNA	1.4	0.05				



ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА **FOAM2**

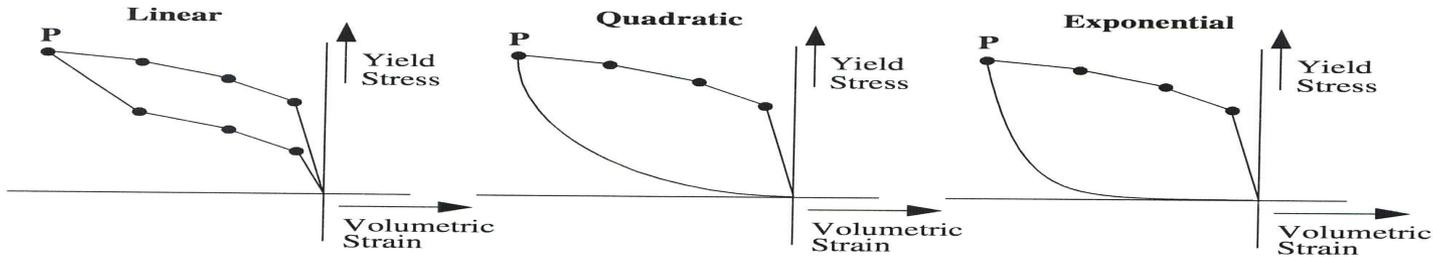
- ❑ Изотропный “пенopodobный” материал с гистерезисом
- ❑ Форма “петли” гистерезиса задаётся пользователем, значение коэффициента Пуассона равно нулю
- ❑ Применим для лагранжевых объёмных элементов
- ❑ Пример: задаётся модуль сдвига (G) или объёмный модуль (K)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FOAM2	MID	RHO	G	K	TABLE	TYPE	VALUE	CUTOFF	+CONT1
FOAM2	3	0.01		3.	111	CRUSH	-100.	SFRAC	+CONT1
+CONT1	TABY	ALPHA	UNLOAD						
+CONT1	112	0.4	LINEAR						
			BULK TYP	BULK Q	BULK L				
			DYNA	1.4	0.05				

Коэффициент диссипации энергии

Вид характеристики материала при “разгрузке”

Характеристика материала при сжатии

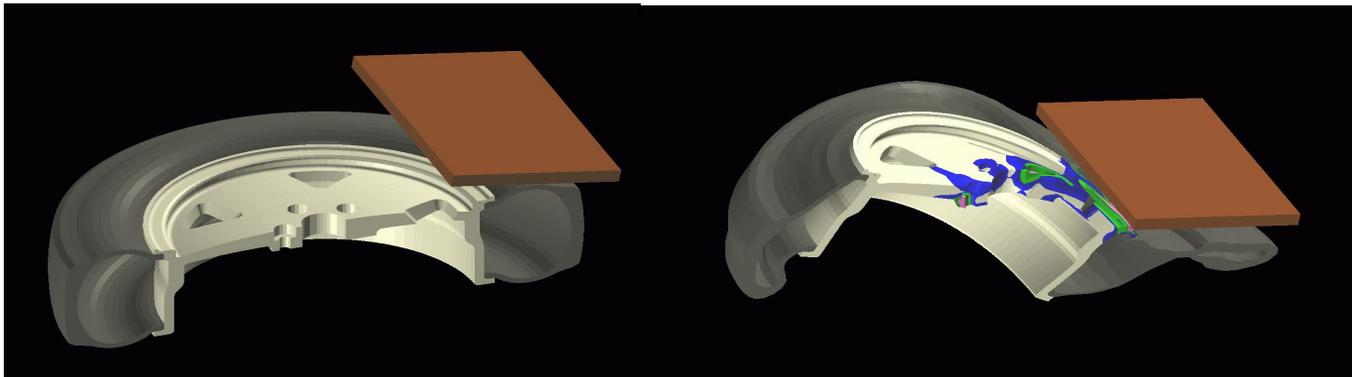


ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА RUBBER1

- ❑ Почти несжимаемый резиноподобный материал
- ❑ Энергия деформации вычисляется в соответствии с моделью Муни-Ривлина (Mooney-Rivlin)
- ❑ Применим только для лагранжевых объёмных элементов

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RUBBER1	MID	RHO	A	B	NU				+CONT1
RUBBER1	3	1000.	0.34	0.27	0.495				+CONT1
+CONT1			BULK TYP	BULK Q	BULK L				
+CONT1									

$0 \leq \mu < 0,5$



УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ

- ❑ Уравнения состояния определяют зависимость давления в материале от изменения его относительного объёма
- ❑ **EOSGAM** – уравнение состояния идеального газа (адиабатический закон)

$$p = (\gamma - 1) \cdot \rho \cdot E,$$

где p – давление;

γ – газовая постоянная;

ρ – “текущая” плотность материала;

E – удельная внутренняя энергия вещества

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ

□ **EOSPOL** – полиномиальное уравнение состояния: давление – степенная функция плотности и внутренней энергии вещества

- При сжатии ($\mu \geq 0$):

$$p = a_1\mu + a_2\mu^2 + a_3\mu^3 + (b_0 + b_1\mu + b_2\mu^2 + b_3\mu^3) \cdot \rho \cdot E,$$

- При растяжении ($\mu < 0$):

$$p = a_1\mu + (b_0 + b_1\mu) \cdot \rho \cdot E,$$

где p – давление;

$$\mu = \rho/\rho_0 - 1;$$

ρ – “текущая” плотность материала;

ρ_0 – плотность материала в “исходном” состоянии;

E – удельная внутренняя энергия вещества;

a_i, b_i – коэффициенты

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ

□ **EOSTAIT** – уравнение состояния, описывающее модель кавитации Тэта (Tait cavitation model)

- При отсутствии кавитации ($\rho > \rho_c$):

$$\rho = a_0 + a_1(\eta \cdot \gamma - 1),$$

- При наличии кавитации ($\rho \leq \rho_c$):

$$\rho = \rho_c,$$

где ρ – давление;

- $\eta = \rho/\rho_0$;
- γ – постоянная;
- ρ – “текущая” плотность материала;
- ρ_0 – плотность материала в “исходном” состоянии;
- ρ_0^* – “критическое” значение плотности вещества – “порог” кавитации

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ

- **EOSJWL** - уравнение состояния JWL (Jones-Wilkins-Lee) – уравнение, описывающее ударную волну в ВВ

$$p = A(1 - \omega\eta/R_1)e^{-R_1/\eta} + B(1 - \omega\eta/R_2)e^{-R_2/\eta} + \omega\eta\rho_0 e,$$

где p – давление;

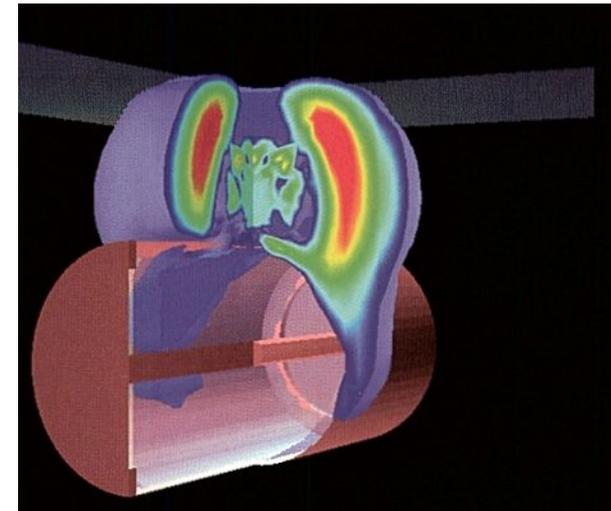
E – удельная внутренняя энергия вещества;

ρ_0 – плотность материала в “исходном” состоянии;

ρ – “текущая” плотность материала;

$\eta = \rho/\rho_0$;

A, B, R_1, R_2, ω - постоянные коэффициенты

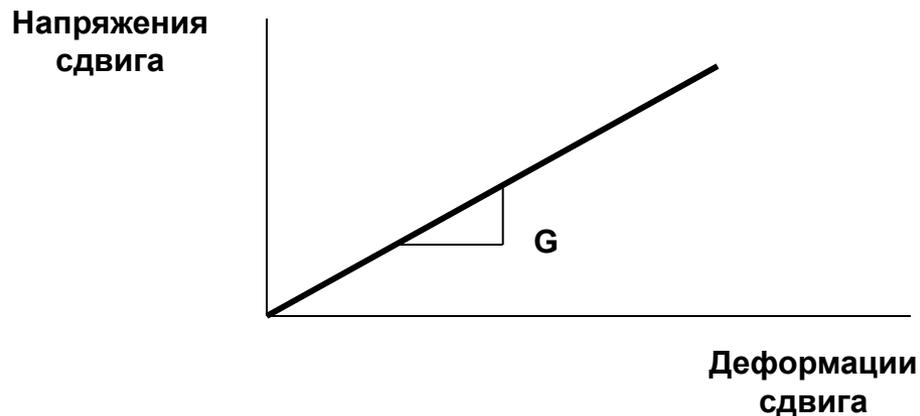


Модель состояния **EOSIG** позволяет учитывать отличие свойств “исходного” ВВ и продуктов детонации, моделировать перенос массы, энергии и т.п. Модель состояния **EOSIG** базируется на уравнениях состояния, подобных уравнению состояния **EOSJWL**

МОДЕЛИ СДВИГОВЫХ СВОЙСТВ

- ❑ Определяют реакцию материала на деформацию сдвига
- ❑ **SHREL** – линейно-упругая характеристика сдвиговых свойств
 - Напряжения сдвига пропорциональны произведению сдвиговых деформаций и модуля сдвига G

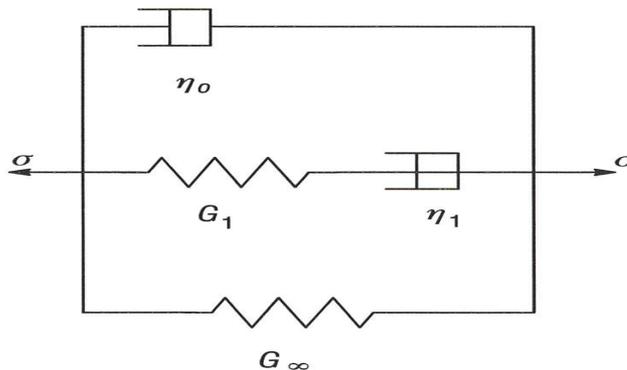
$$\tau = G \cdot \gamma$$



МОДЕЛИ СДВИГОВЫХ СВОЙСТВ

□ SHRLVE – изотропная, линейная вязко-упругая модель сдвиговых свойств

- Механический аналог модели SHRLVE – совокупность соединённых параллельно пружины, вязкого демпфера и элемента Максвелла



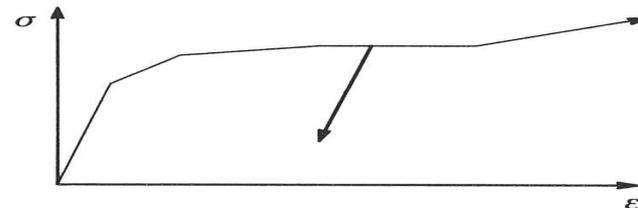
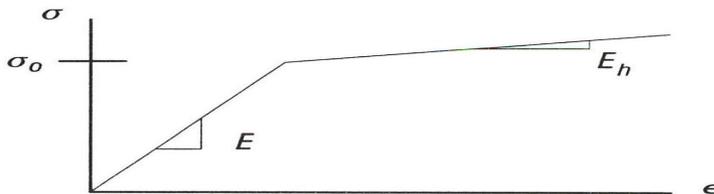
$$\beta = G_1 / \eta_1$$

$$G_1 = G_0 - G_\infty$$

- ✓ G_0 – “краткосрочный” модуль сдвига
- ✓ G_∞ – “долгосрочный” модуль сдвига
- ✓ β - коэффициент поглощения элемента Максвелла
- ✓ η_0 – коэффициент поглощения сдвиговых деформаций

МОДЕЛИ ТЕКУЧЕСТИ (ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ)

- ❑ Модели предельного состояния описывают условия перехода вещества из упругого состояния в состояние текучести и характеристики материала, находящегося в этом состоянии
- ❑ **YLDHY** – гидродинамическая модель предельного состояния
 - Напряжение текучести тождественно равно нулю, т.е. материал не воспринимает сдвиговые нагрузки и ведёт себя как жидкость
- ❑ **YLDVM** – модель предельного состояния Мизеса
 - Модель нелинейного изотропного упрочнения с кусочно-линейной зависимостью напряжения от деформации
 - Используется для моделирования балок, оболочек и для объёмных элементов



МОДЕЛИ ТЕКУЧЕСТИ (ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ)

- **YLDJ3** – модель предельного состояния Johnson-Cook’a

$$\sigma_y = (A + B \cdot \epsilon_p^n) \cdot [1 + C \cdot \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)] \{1 - [(T - T_r)/(T_m - T_r)]^m\},$$

где ϵ_p – “текущее” значение пластической деформации;

$\dot{\epsilon}$ – “текущее” значение “скорости” деформации;

ϵ_0 – параметр;

T – температура;

T_r – температура окружающей среды;

T_m – температура плавления вещества;

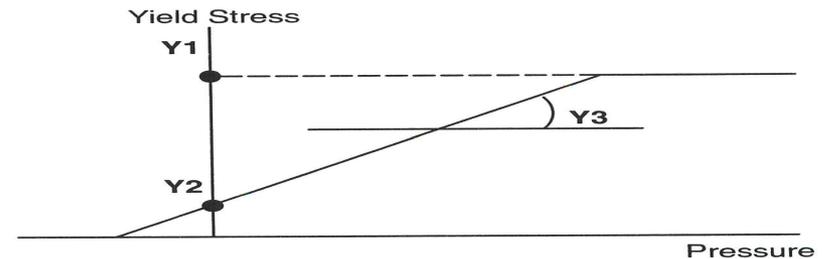
A, B, n, C, m – постоянные коэффициенты

- **YLDMC** – модель текучести Мора-Кулона (Mohr-Coulomb) – применима только для *эйлеровых* материалов, воспринимающих сдвиговую нагрузку

$$\sigma_y = \min (Y1, Y2 + Y3 \cdot p),$$

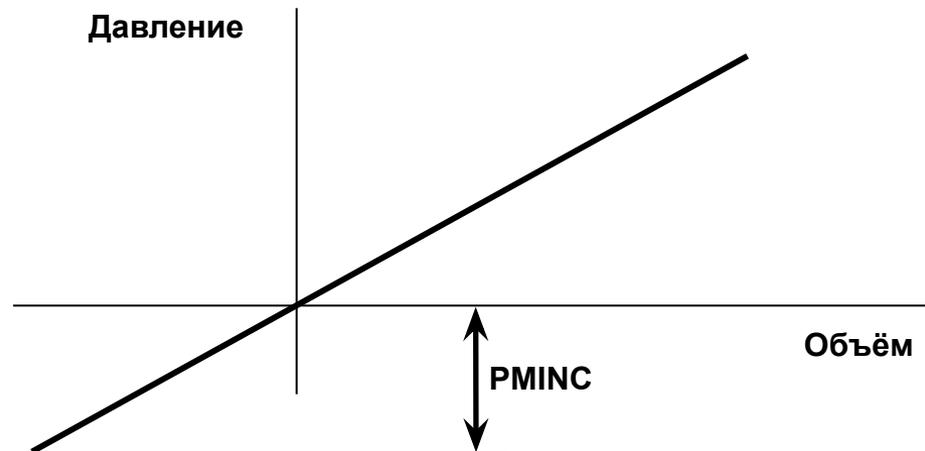
где $Y1, Y2, Y3$ – константы;

p – давление



МОДЕЛЬ НАРУШЕНИЯ СПЛОШНОСТИ

- ❑ Определяет минимальное значение давления, при котором нарушается сплошность материала - возникает разрыв
- ❑ **P_{MINC}** – напряжение нарушения сплошности постоянно



МОДЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ

- ❑ Определяют условия разрушения материала (после которого элемент в вычислениях “не участвует”)
- ❑ **FAILMPS** – задаётся уровень эквивалентных деформаций, при котором наступает (вязкое) разрушение материала
- ❑ **FAILEXn** – модели разрушения, определяемые пользовательскими подпрограммами (FAILEX – мгновенное разрушение, FAILEX1 – возможность постепенной деградации свойств материала DMATOR)
- ❑ **FAILEST** – разрушение при достижении эквивалентным напряжением определённого уровня (при этом происходит потеря возможности восприятия элементом сдвиговых нагрузок, “гидродинамические” свойства сохраняются) и при уменьшении шага интегрирования ниже определённого предела (после этого происходит “полное” разрушение элемента) – модель *двухэтапного* разрушения

МОДЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ

- ❑ **FAILMES** – разрушение при достижении эквивалентным напряжением заданного предельного уровня
- ❑ **FAILPRS** – разрушение при достижении гидродинамическим давлением заданного максимального уровня
- ❑ **FAILSDT** - разрушение при достижении эквивалентными пластическими деформациями определённого уровня (при этом происходит потеря возможности восприятия элементом сдвиговых нагрузок, “гидродинамические” свойства сохраняются) и при уменьшении шага интегрирования ниже определённого предела (после этого происходит “полное” разрушение элемента) – модель *двухэтапного* разрушения

ПРИМЕР ОПИСАНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА

□ Пример описания свойств стали (материал № 333) со следующими свойствами:

- Плотность 7830 кг/м³
- Объёмный модуль $1,69 \cdot 10^{11}$ Н/м²
- Модуль сдвига $8,18 \cdot 10^{10}$ Н/м²
- Предел текучести $5,0 \cdot 10^8$ Н/м²
- Напряжение нарушения сплошности (“разрыва”) - $3,8 \cdot 10^9$ Н/м²
- Условие разрушения – достижение 50%-ой пластической деформации

$$K = E/[3 \cdot (1-2\nu)]$$

DMAT, 333, 7830., 444, 555, 666, 777, 888

EOSPOL, 444, 1.69E11

SHREL, 555, 9.18E10

YLDVM, 666, 5.E8

FAILMPS, 777, 0.5

PMINC, 888, -3.8E9