

XIII Международная конференция  
«ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»  
20–24 марта 2017 г., РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск,  
Челябинская область, Россия

С.А. Зелепугин, А.С. Бодров, А.С. Зелепугин, Ю.Ф. Христенко

---

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕДНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ КАНАЛЬНО- УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ

---

Российская академия наук, Сибирское отделение, Томский научный центр  
(ТНЦ СО РАН), Томск, Россия, [szel@dsm.tsc.ru](mailto:szel@dsm.tsc.ru)

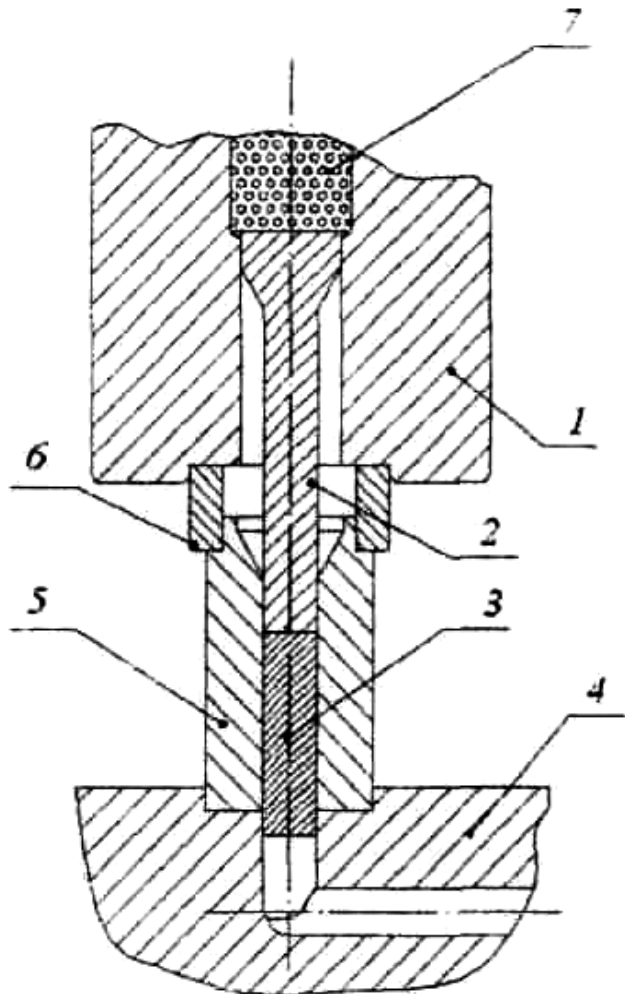
Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
(ТГУ), Томск, Россия, [szel@yandex.ru](mailto:szel@yandex.ru)

Объемные наноструктурные и ультрамелкозернистые (УМЗ) металлы и сплавы - перспективные конструкционные и функциональные материалы



Свойства металлов, полученных методами интенсивной пластической деформации:

- ✓ повышенная в несколько раз, по сравнению с крупнозернистыми аналогами, прочность, сочетающаяся с хорошей пластичностью;
- ✓ низкотемпературная и высокотемпературная сверхпластичность;
- ✓ циклическая и радиационная стойкость.



**Общая схема установки для ДКУП (предложена и реализована в РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск).**

**1 – ствол, 2 – поршень, 3 – образец, 4 – матрица, 5 – направляющая втулка, 6 – кольцо, 7 – пороховой заряд.**

### **ПРЕИМУЩЕСТВА ДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА:**

- размеры заготовок могут быть значительно больше, чем в РКУП;
- не требуется дорогостоящее прессовое оборудование;
- процесс углового прессования происходит значительно быстрее, чем в статических условиях.

**Основное преимущество метода ДКУП по сравнению с РКУП состоит в том, что увеличивается скорость пластического деформирования, а также добавляется ударно-волновая деформация, которая увеличивает общий результат воздействия.**

Образец:  $\varnothing=16$  мм,  $L=65$  мм

Скорость деформации образцов:  $10^4 - 10^5$  с<sup>-1</sup>.

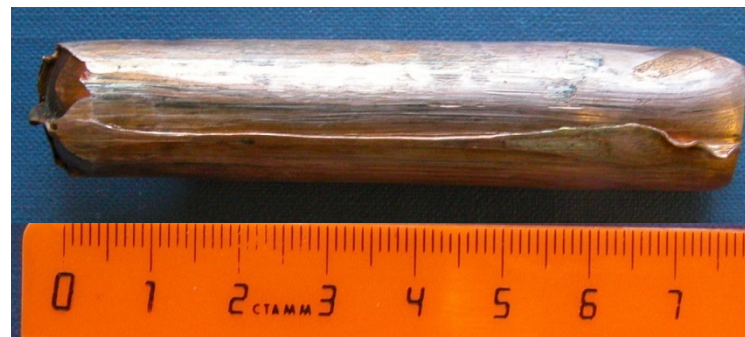
Начальная скорость: 100 – 500 м/с.

Максимальное давление: 7 ГПа.

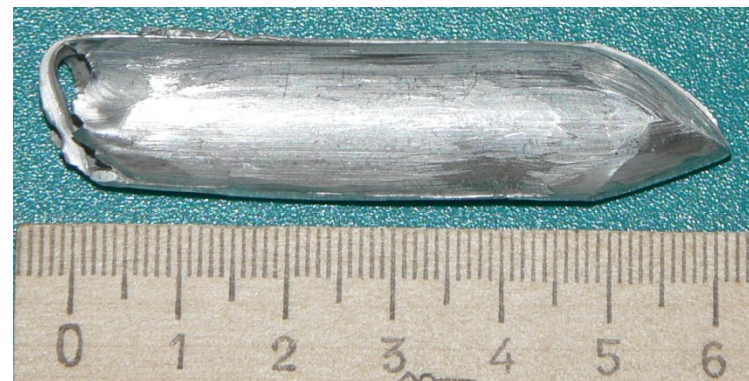
**Примеры полученных образцов после динамической интенсивной пластической деформации**



**Титан VT-1-0**



**Медь М1**



**Внешний вид образца из АМц после 4 проходов через каналы оснастки**

**Шорохов Е.В., Жгилев И.Н., Хомская И.В. и др.**  
Высокоскоростное деформирование металлических материалов методом канально-углового прессования для получения ультрамелкозернистой структуры  
*Деформация и разрушение материалов.*- 2009.- №2.- С. 36 - 40.

### Модель упругопластической повреждаемой среды

Среда характеризуется наличием микрополостей (пор, трещин).

Общий объем среды  $W$  составляют неповрежденная часть среды  $W_c$  с плотностью  $\rho_c$  и микрополости  $W_f$ , в которых плотность принимается нулевой.

Средняя плотность среды  $\rho = \rho_c (W_c/W)$

Степень поврежденности среды характеризуется удельным объемом микроповреждений

$$V_f = W_f/(W \cdot \rho)$$

**Система уравнений**, описывающая нестационарные адиабатические (как при упругом, так и при пластическом деформировании) движения прочной сжимаемой среды с учетом зарождения и эволюции микроповреждений **состоит из уравнений неразрывности, движения, энергии**:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0, \quad \frac{dv_i}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}, \quad \rho \frac{dE}{dt} = \sigma_{ij} \varepsilon_{ij},$$

где  $\rho$  - плотность,  $t$  – время,  $v$  - вектор скорости с компонентами  $v_i$ ,

$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + S_{ij}$  – компоненты тензора напряжений,

$E$  – удельная внутренняя энергия,

$\varepsilon_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформаций,

$P = P_c(\rho/\rho_c)$  – среднее давление,

$\delta_{ij}$  – символ Кронекера,

$S_{ij}$  – компоненты девиатора напряжений,

$P_c$  – давление в сплошной компоненте вещества.

Давление в неповрежденном веществе является функцией удельного объема, удельной внутренней энергии, удельного объема микрповреждений и во всем диапазоне условий нагружения определяется с помощью **уравнения состояния типа Ми-Грюнайзена**:

$$P_c = \rho_0 a^2 \mu + \rho_0 a^2 [1 - \gamma_0/2 + 2(b-1)] \mu^2 + \\ + \rho_0 a^2 [2(1 - \gamma_0/2)(b-1) + 3(b-1)^2] \mu^3 + \gamma_0 \rho_0 E$$

где  $\mu = V_0/(V-V_p) - 1$ ,  $\gamma_0$  - коэффициент Грюнайзена,  $V_0$  и  $V$  — начальный и текущий удельные объемы,  $a$  и  $b$  - константы адиабаты Гюгонио, описываемой линейным соотношением  $u_s = a + bu_p$ , где  $u_s$  - скорость ударной волны,  $u_p$  - массовая скорость вещества за фронтом ударной волны.

Используется предположение, что на изменение пористости (как роста пор, так и их схлопывания) влияет только шаровая компонента напряжений (давление), а компоненты девиатора напряжений ограничены независимой девиаторной функцией текучести:

$$2G \left( \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right) = \frac{dS_{ij}^0}{dt} + \lambda S_{ij}$$

$$\frac{dS_{ij}^0}{dt} = \frac{dS_{ij}}{dt} - S_{ik} \omega_{jk} - S_{jk} \omega_{ik}$$

Где  $dS_{ij}^0/dt$  производная по Яуману,  $G$  - модуль сдвига. Параметр  $\lambda$  тождественно равен 0 при упругой деформации, а при наличии пластической исключается с помощью **условия текучести Мизеса**:

$$S_{ij} S_{ij} = \frac{2}{3} \sigma^2$$

где  $\sigma$  - динамический предел текучести.

**Кинетическая модель разрушения активного типа**

Моделирование **разрушений «отрывного» типа** проводится с помощью кинетической модели разрушения активного типа, определяющей рост микроповреждений, непрерывно изменяющих свойства материала и вызывающих релаксацию напряжений. Модель была разработана в ИПХФ РАН (Черноголовка) на основе экспериментальных данных. Предполагалось, что в материале имеются потенциальные очаги разрушения одинаковых начальных размеров с эффективным удельным объемом  $V_1$ , на которых образуются и растут трещины или поры при превышении растягивающим давлением  $P_c$  некоторой критической величины  $P^*$ , которая уменьшается по мере роста образовавшихся микроповреждений. Константы  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $P_k$ ,  $K_f$  подбирались путем сопоставления результатов расчетов и экспериментов по регистрации скорости свободной поверхности при нагружении образца плоскими импульсами сжатия. Один и тот же набор констант материала используется при расчете как роста, так и схлопывания трещин или пор в зависимости от знака  $P_c$ .

$$\frac{dV_f}{dt} = \begin{cases} 0, & \text{если } |P_c| \leq P^* \text{ или } (P_c > P^* \text{ и } V_f = 0) \\ -\text{sign}(P_c) K_f (|P_c| - P^*) (V_2 + V_f), & \\ & \text{если } P_c < -P^* \text{ или } (P_c > P^* \text{ и } V_f > 0) \end{cases}$$

где  $P^* = P_k V_1 / (V_f + V_1)$ ;

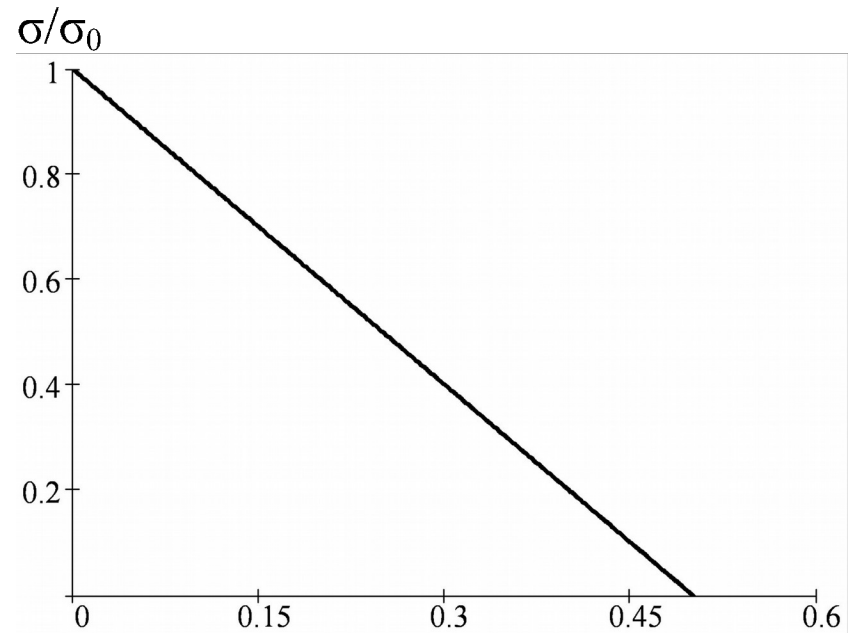
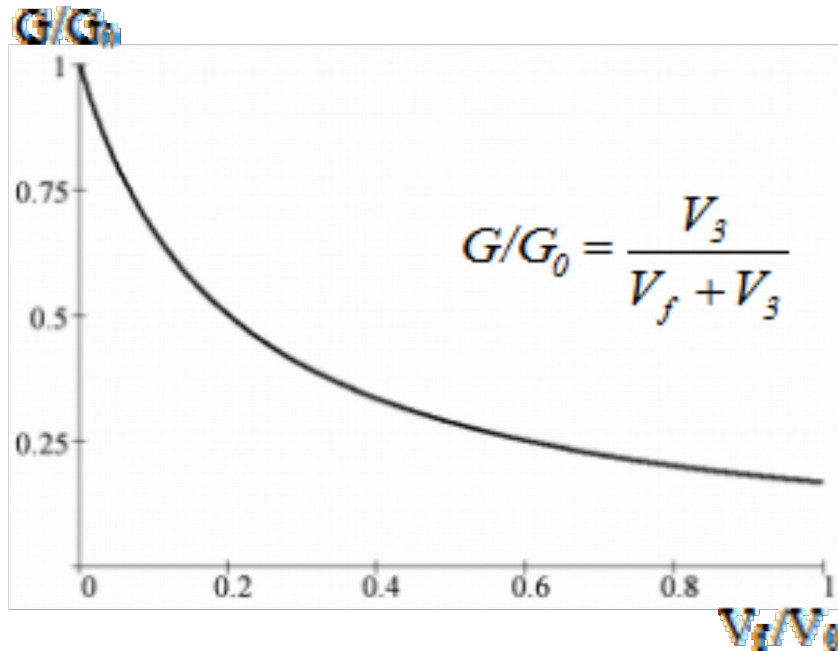
$V_1, V_2, P_k, K_f$  – экспериментально определяемые константы материала ( $P^* > 0$ )

Модуль сдвига  $G$  и динамический предел текучести определяются согласно соотношениям:

$$G = G_0 K_T \left( 1 + c \frac{p}{(1 + \mu)^{1/3}} \right) \frac{V_3}{(V_f + V_3)} \quad \sigma = \begin{cases} \sigma_0 K_T \left( 1 + c \frac{p}{(1 + \mu)^{1/3}} \right) \left( 1 - \frac{V_f}{V_4} \right), & \text{если } V_f \leq V_4 \\ 0, & \text{если } V_f > V_4 \end{cases}$$

где  $c$ ,  $V_3$ ,  $V_4$ ,  $T_1$  – константы материала

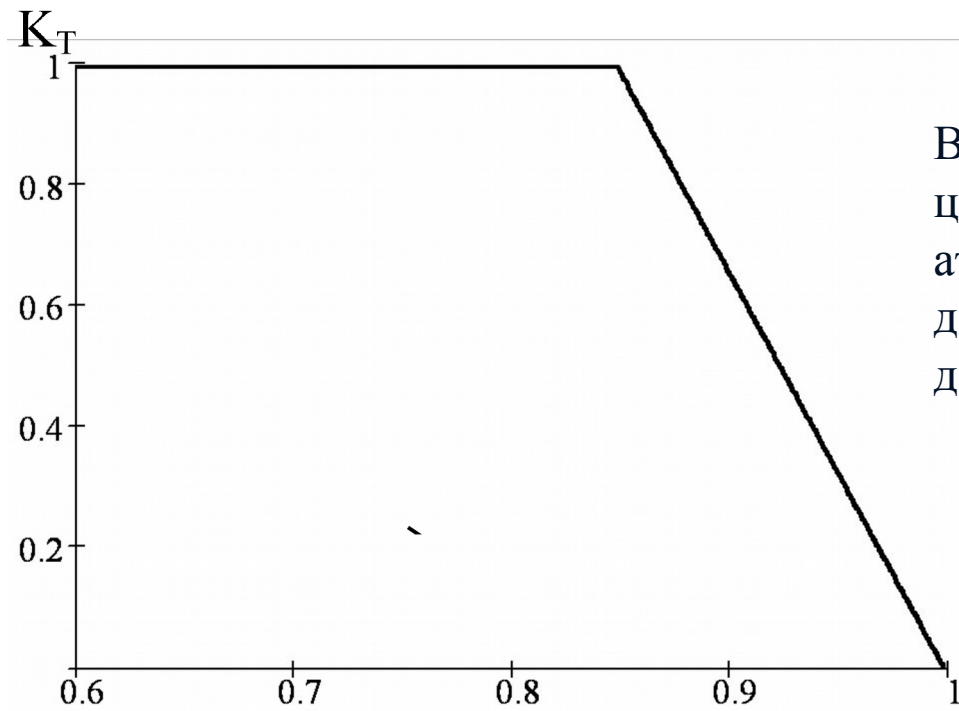
Типичные зависимости модуля сдвига и динамического предела текучести от объема микрповреждений  $V_f$ :





$$K_T = \begin{cases} 1, & \text{если } T_0 \leq T \leq T_1 \\ \frac{T_m - T}{T_m - T_1}, & \text{если } T_1 < T < T_m \\ 0, & \text{если } T \geq T_m \end{cases}$$

Здесь  $T_m$  - температура плавления вещества,  
 $T_1$  – константа материала,  $T_0$  – начальная температура.



Выбор функции осуществлялся с целью моделировать в расчетах атермический характер пластического деформирования при скоростях деформирования  $10^4 \text{ с}^{-1}$  и выше.

Для вычисления температуры использовалась тепловая составляющая удельной внутренней энергии:

$$dT = \begin{cases} d(E - E_{0x}) / c_p, & \text{если } T < T_m \\ 0, & \text{если } T = T_m \\ d(E - E_{0x} - \Delta H_m) / c_p, & \text{если } T > T_m \end{cases}$$

холодная составляющая удельной внутренней энергии  $E_{0x}$  определяется выражением :

$$E_{0x} = \begin{cases} E_0, & \text{если } \xi < 0 \\ E_0 + E_1\xi + E_2\xi^2 + E_3\xi^3 + E_4\xi^4, & \text{если } \xi \geq 0 \end{cases}$$

где  $\xi = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_c}$   $\Delta H_m$  - удельная теплота плавления,  $T_0$  - начальная температура,

$$E_0 = -T_0 c_p^0 \quad E_1 = \gamma_0 E_0 \quad E_2 = (a^2 + \gamma_0^2 E_0) / 2 \quad E_3 = (4ba^2 + \gamma_0^3 E_0) / 6$$

$$E_4 = (-2\gamma_0 ba^2 + 18a^2 b^2 + \gamma_0^4 E_0) / 24 \quad c_p^0, c_p^L \text{ - константы материала.}$$

Удельная теплоемкость  $c_p$  возрастает линейно с ростом температуры до температуры плавления вещества:

$$c_p = \begin{cases} c_p^0 + \frac{c_p^L - c_p^0}{T_m - T_0} (T - T_0), & \text{если } T_0 \leq T < T_m \\ c_p^L, & \text{если } T \geq T_m \end{cases}$$

$T_0$

$T_m$

## Модель Джонсона – Кука

$$\sigma' = \left( \sigma_0 + B e_{eq}^n \right) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_{eq}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^r \right)$$

Здесь  $e_{eq}$  – эквивалентная пластическая деформация,  $\dot{\varepsilon}_{eq}$  – эквивалентная скорость пластической деформации,  $\dot{\varepsilon}_0$  – начальное значение эквивалентной скорости пластической деформации ( $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0 \text{ с}^{-1}$ ),  $T_0$ ,  $T$ ,  $T_m$  – начальная, текущая температуры и температура плавления, соответственно,  $B$ ,  $C$ ,  $n$ ,  $r$  – константы модели Джонсона-Кука. Также  $\sigma_0$  – константа материала, статический предел текучести.

A CONSTITUTIVE MODEL AND DATA FOR METALS SUBJECTED TO LARGE STRAINS, HIGH STRAIN RATES AND HIGH TEMPERATURES

Gordon R. Johnson  
Honeywell Inc.  
Defense Systems Division  
Hopkins, Minnesota 55343 USA

William H. Cook  
Air Force Armament Laboratory  
Eglin Air Force Base, Florida 32542 USA

This paper presents a constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. The basic form of the model is well suited for computations because it uses variables which are readily available in most of the applicable computer codes. The materials considered are OFHC copper, Cartridge brass, Nickel 200, Armco iron, Carpenter electrical iron, 1006 steel, 2024-T351 aluminum, 7039 aluminum, 4340 steel, S-7 tool steel, Tungsten alloy and DU-75Ti (depleted uranium). The data for the material constants are obtained from torsion tests over a wide range of strain rates, static tensile tests, dynamic Hopkinson bar tensile tests and Hopkinson bar tests at elevated temperatures. The model and data are evaluated by comparing computational results with data from cylinder impact tests.

INTRODUCTION

During recent years there has been a great deal of effort directed at computations for intense impulsive loading due to high-velocity impact and explosive detonation. The capabilities of current computer codes have been extended to the point that the limiting factor is often that of adequately defining material characteristics for both strength and fracture. A common approach is to simply repeat the computations with different material characteristics until agreement with experiment is obtained. Clearly it would be desirable to be able to characterize materials with a limited number of laboratory tests so the initial computations could be used with more confidence. This would result in a more efficient design cycle and would also give increased insight into understanding the complicated processes which occur during intense impulsive loading conditions.

This paper presents a constitutive model which is primarily intended for computations. It is recognized that more complicated models may indeed give more accurate descriptions of material behavior. Similarly, various models may give better descriptions for various materials. In many instances, however, the computational user cannot readily incorporate complicated and diverse models. The result is that a constant "dynamic flow stress" is often used.

In the following sections test data will be presented and the approach used to extract the appropriate material constants from the data will be explained. This will be done in detail for three materials (OFHC copper, Armco iron and 4340 steel). Results for the other nine materials will be included, but with limited discussion. Finally, the model and data will be evaluated by comparing computational results to data from cylinder impact tests.

TEST DATA

The test data are primarily obtained from torsion tests over a wide range of strain rates (quasi-static to

about  $400 \text{ s}^{-1}$ ) and dynamic Hopkinson bar tensile tests over a range of temperatures. Static tensile test data are also used. The specific torsion testing apparatus is described in [1] and a representative Hopkinson bar apparatus is described in [2].

Figure 1 shows Hopkinson bar test data at various temperatures. The elevated temperatures are obtained by surrounding the in-place test specimen by an oven such that the temperatures are applied for several minutes prior to testing. Although it is possible to test materials to greater strains than those shown in Figure 1, the Hopkinson bar data cannot be accurately evaluated after necking begins to occur in the tensile specimens. Furthermore, at large strains the effects of adiabatic heating can also complicate the results. The elevated temperatures show a distinct softening effect on the strength of the materials.

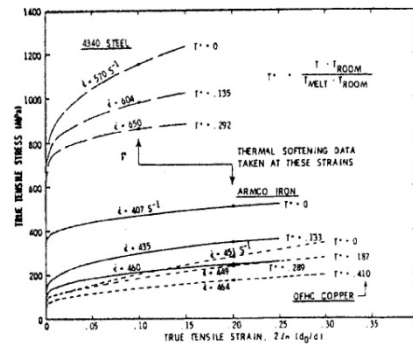


Figure 1. Stress-Strain Data for Hopkinson Bar Tests at Various Temperatures

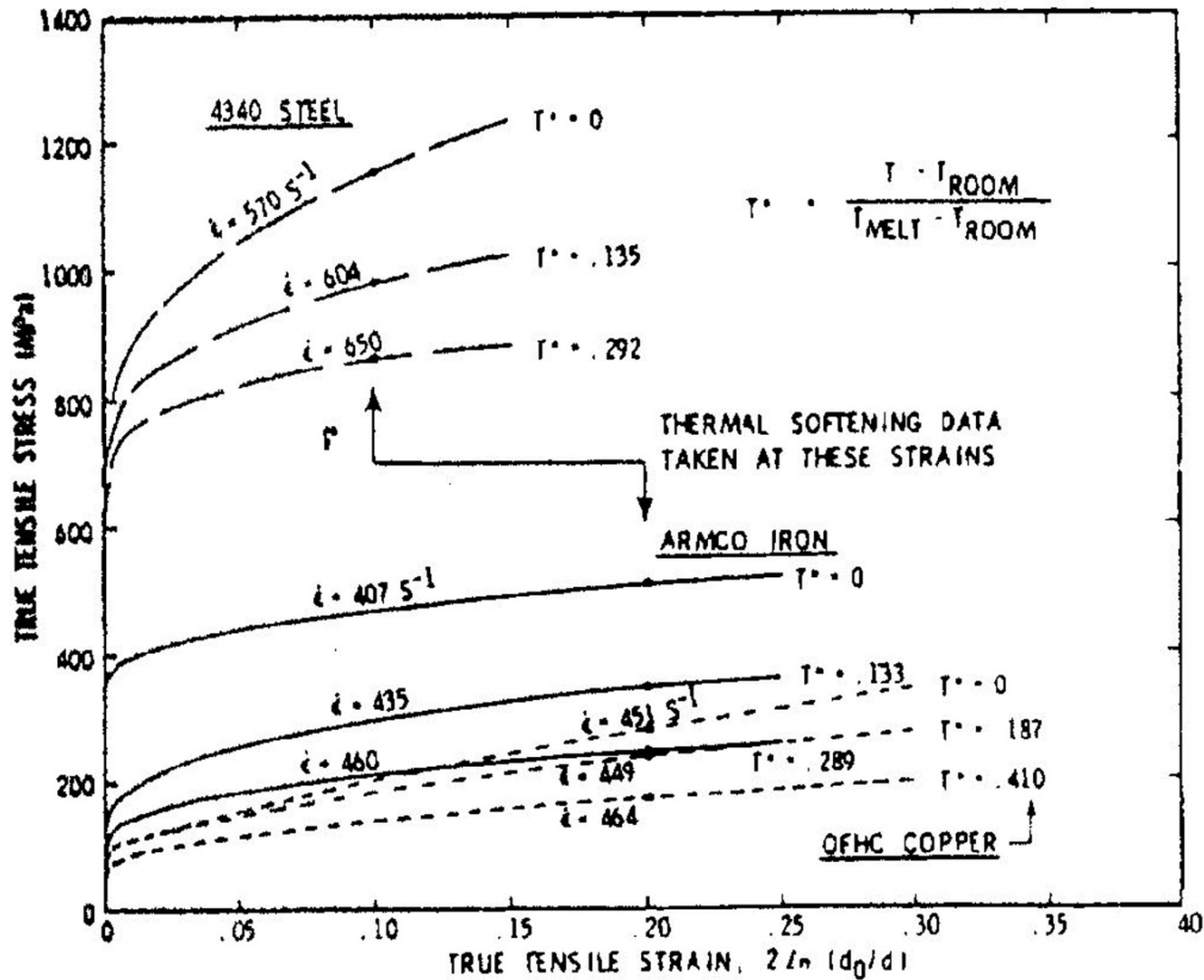


Figure 1. Stress-Strain Data for Hopkinson Bar Tests at Various Temperatures

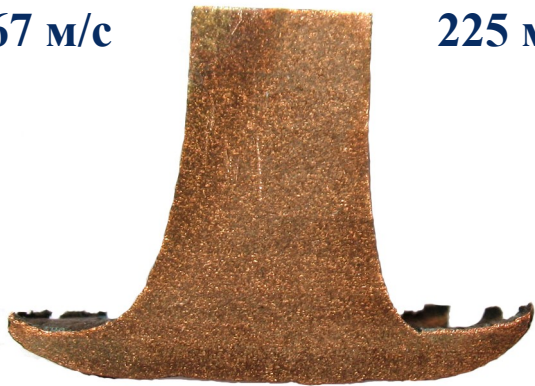
Table 1. Constitutive Constants for the Various Materials

MATERIAL	DESCRIPTION				CONSTITUTIVE CONSTANTS FOR $\sigma = [A + B\epsilon^n][1 + C\ln\epsilon^*][1 - T^m]$				
	HARDNESS (ROCKWELL)	DENSITY (KG/M <sup>3</sup> )	SPECIFIC HEAT (J/KGK)	MELTING TEMPERATURE (K)	A (MPA)	B (MPA)	n	C	m
OFHC COPPER	F-30	8960	383	1356	90	292	.31	.025	1.09
CARTRIDGE BRASS	F-67	8520	385	1189	112	505	.42	.009	1.68
NICKEL 200	F-79	8900	446	1726	163	648	.33	.006	1.44
ARMCO IRON	F-72	7890	452	1811	175	380	.32	.060	0.55
CARPENTER ELECTRICAL IRON	F-83	7890	452	1811	290	339	.40	.055	0.55
1006 STEEL	F-94	7890	452	1811	350	275	.36	.022	1.00
2024-T351 ALUMINUM	B-75	2770	875	775	265	426	.34	.015	1.00
7039 ALUMINUM	B-76	2770	875	877	337	343	.41	.010	1.00
4340 STEEL	C-30	7830	477	1793	792	510	.26	.014	1.03
S-7 TOOL STEEL	C-50	7750	477	1763	1539	477	.18	.012	1.00
TUNGSTEN ALLOY(.07Ni, .03Fe)	C-47	17000	134	1723	1506	177	.12	.016	1.00
DU-.75Ti	C-45	18600	117	1473	1079	1120	.25	.007	1.00



167 м/с

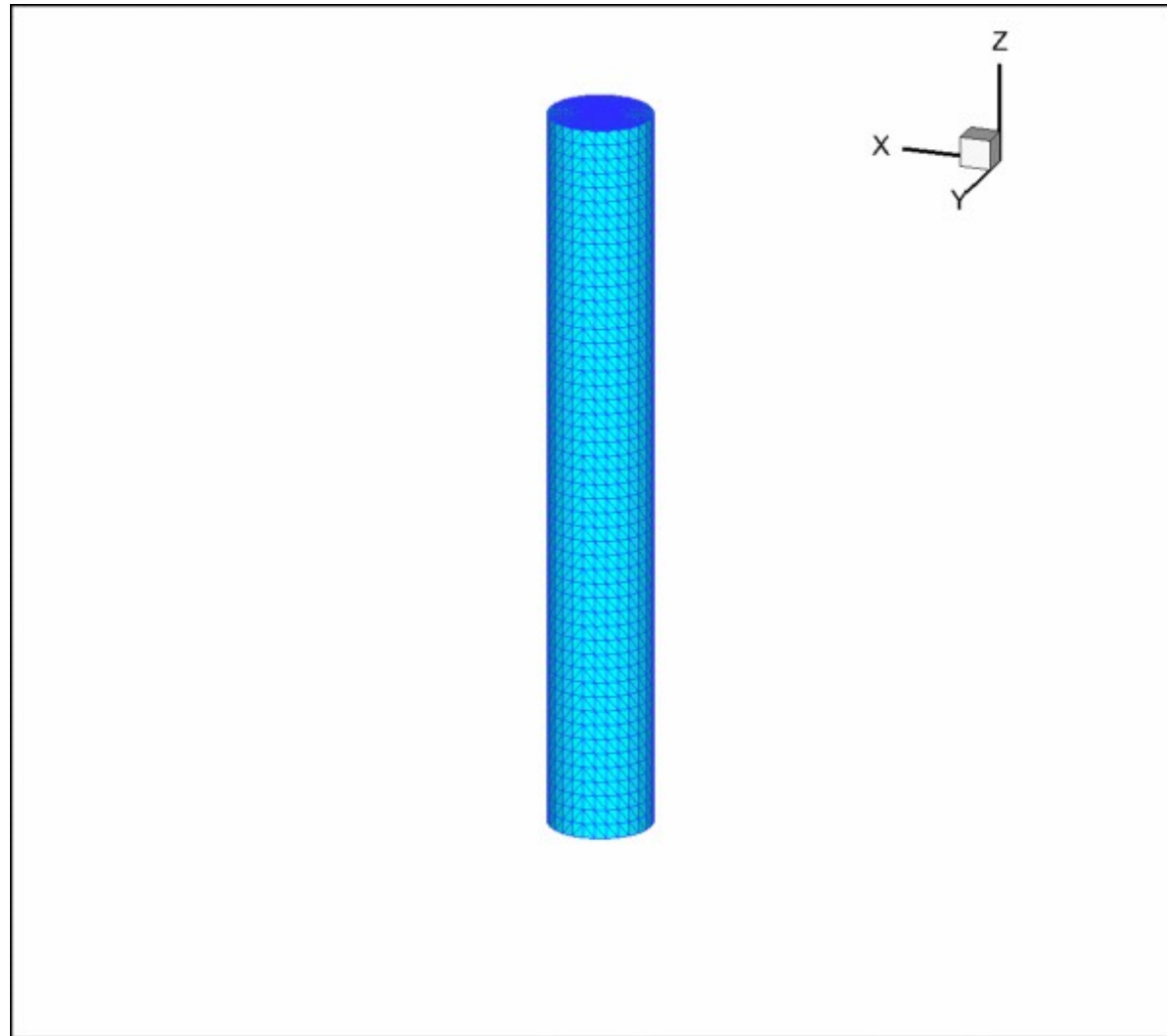
225 м/с



316 м/с



Медь М1





## Постановка задачи

Граничные условия имеют вид:

$$T_x(t,x,y,z) = 0, T_y(t,x,y,z) = 0,$$

$$T_z(t,x,y,z) = P \cdot S_{R_1} \text{ при } (x,y,z) \in R_1,$$

$$T_{m_1}(t,x,y,z) = T_{m_2}(t,x,y,z) = T_{m_3}(t,x,y,z) = 0 \text{ при } (x,y,z) \in R_2;$$

$$T_{m_1}(t,x,y,z) = T_{m_2}(t,x,y,z) = 0, v_n(t,x,y,z) = 0 \text{ при } (x,y,z) \in R_0,$$

Начальные условия имеют вид:

$$\sigma_{ij}(0,x,y,z) = 0, P(0,x,y,z) = 0,$$

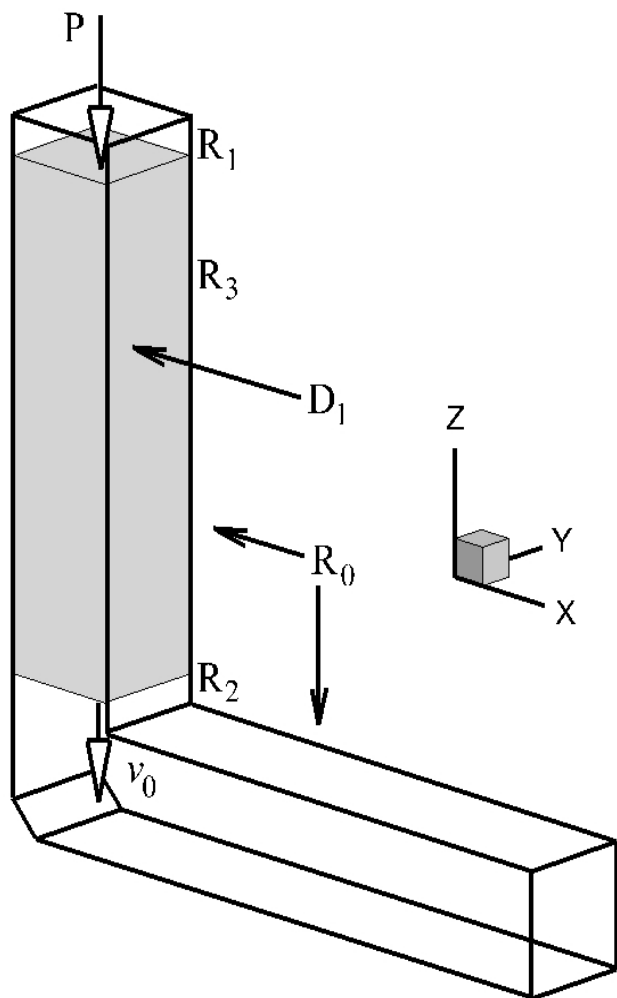
$$E(0,x,y,z) = 0, V_f(0,x,y,z) = 0 \text{ при } (x,y,z) \in D_1;$$

$$v_x(0, x, y, z) = v_y(0, x, y, z) = 0,$$

$$v_z(0, x, y, z) = v_0 \text{ при } (x,y,z) \in D_1;$$

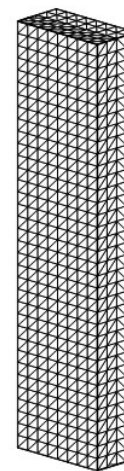
$$\rho(0, x, y, z) = \rho_0 \text{ при } (x,y,z) \in D_1.$$

Процесс динамического деформирования моделировался на примере медных образцов размерами в сечении 16x16 мм и высотой 65 мм. Начальная скорость образцов варьировалась в диапазоне 0 – 200 м/с, давление  $P = 0.1 - 1.5$  ГПа. Угол пересечения каналов 90°. В области внешнего угла стенок каналов матрицы задана наклонная площадка под углом 45°.

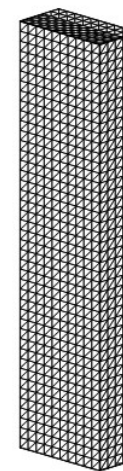


Исследование сходимости результатов расчетов на сетках с различным числом элементов:

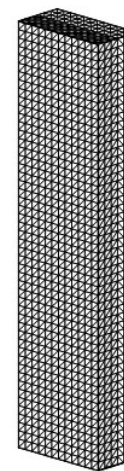
№ сетки	Число узлов по x	Число узлов по y	Число узлов по z	Общее кол-во узлов	Общее кол-во элементов	Шаг сетки по x, мм	Шаг сетки по y, мм	Шаг сетки по z, мм
1	9	5	36	1620	6720	2	2	1,86
2	11	6	44	2904	12900	1,6	1,6	1,51
3	13	7	52	4732	22032	1,33	1,33	1,27



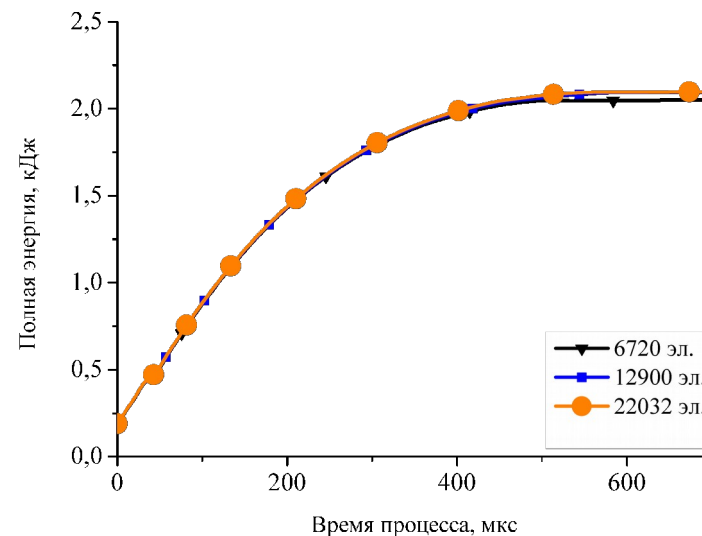
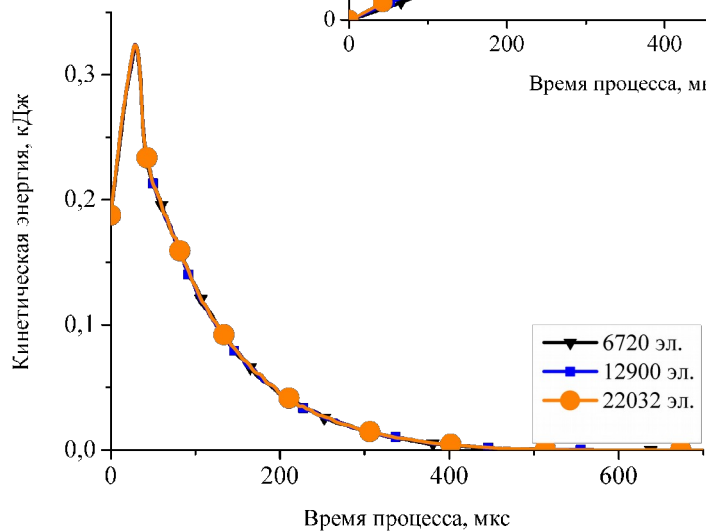
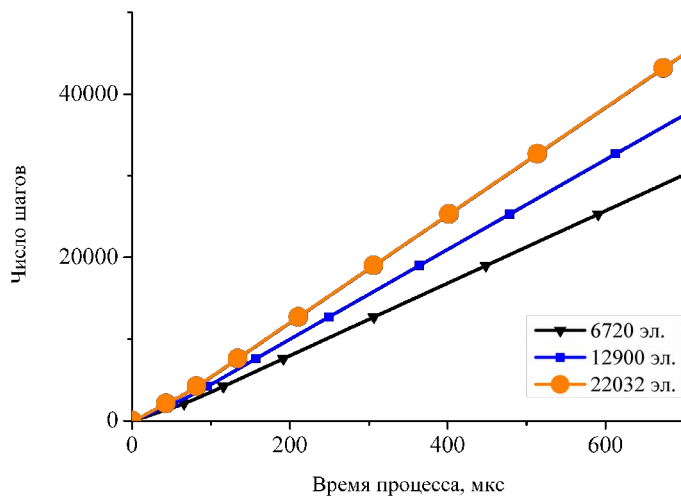
1



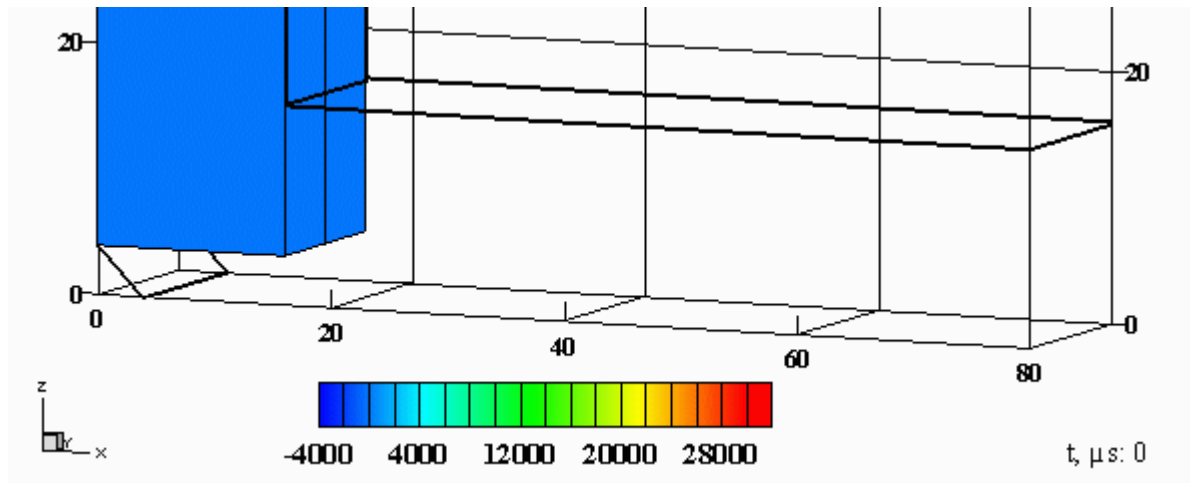
2



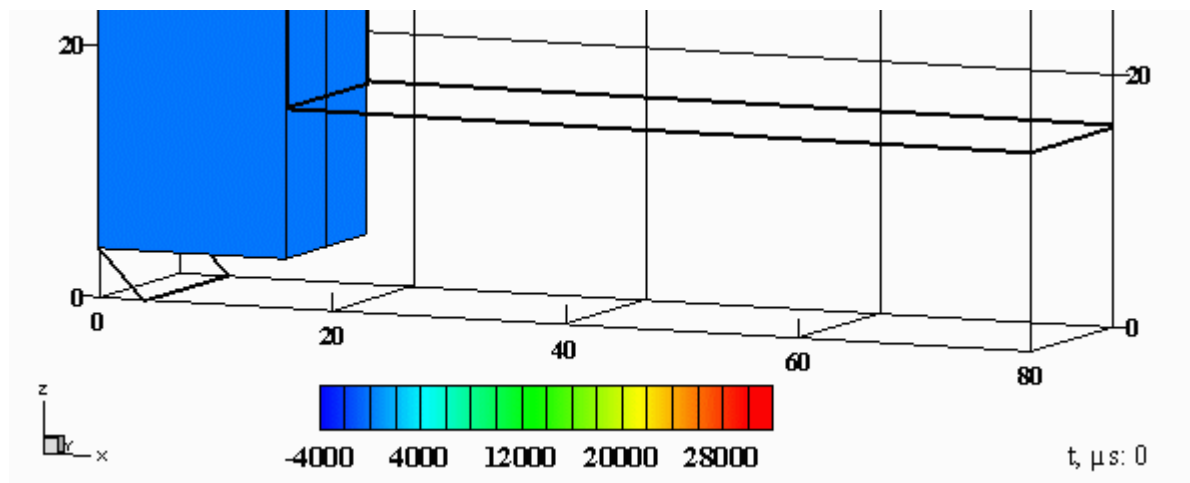
3



## Компоненты скоростей деформаций



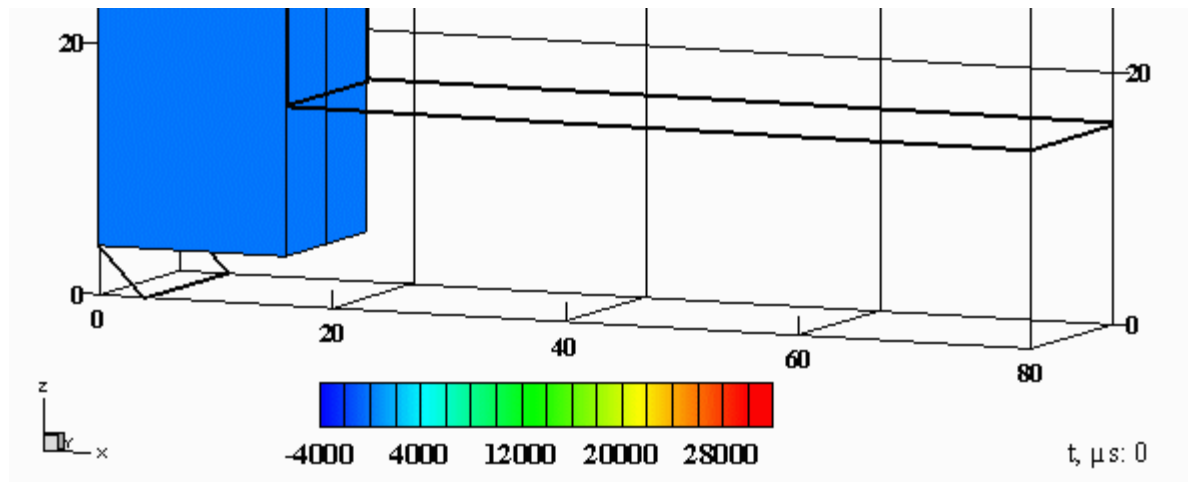
$e_{xx}$



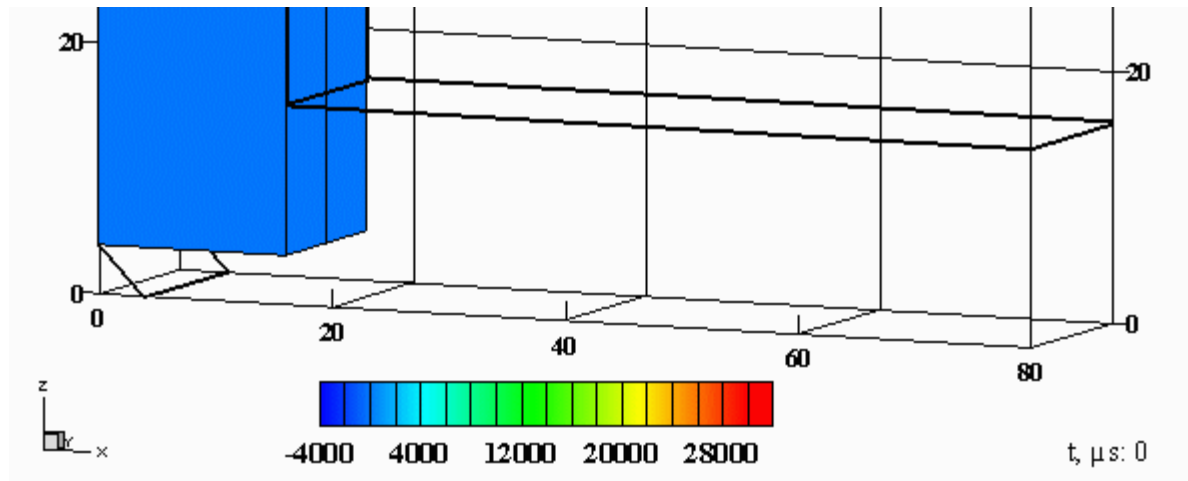
$e_{zz}$

$v_0=70 \text{ м/с}, P=0.5 \text{ ГПа}$

## Параметры модели Джонсона - Кука



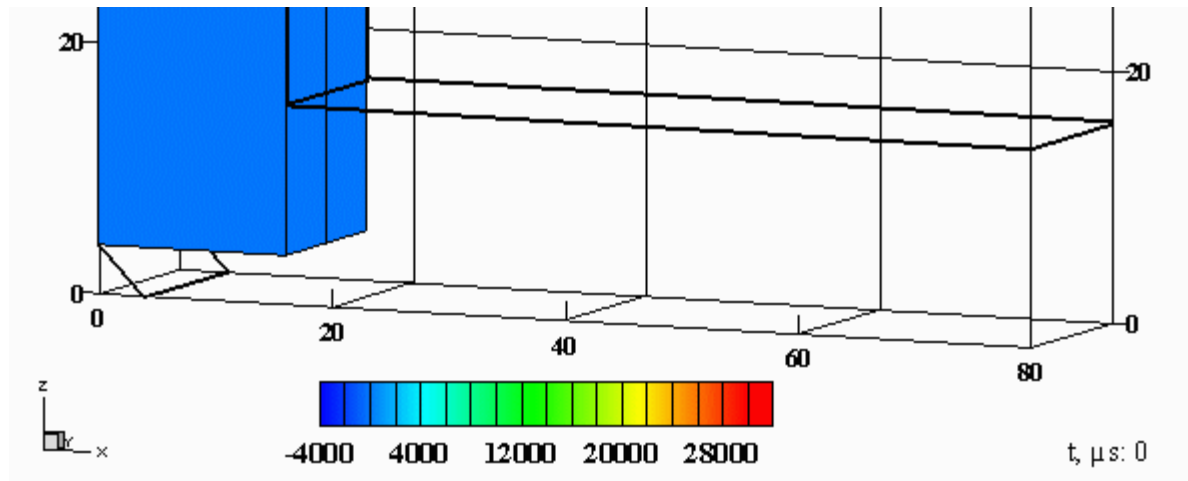
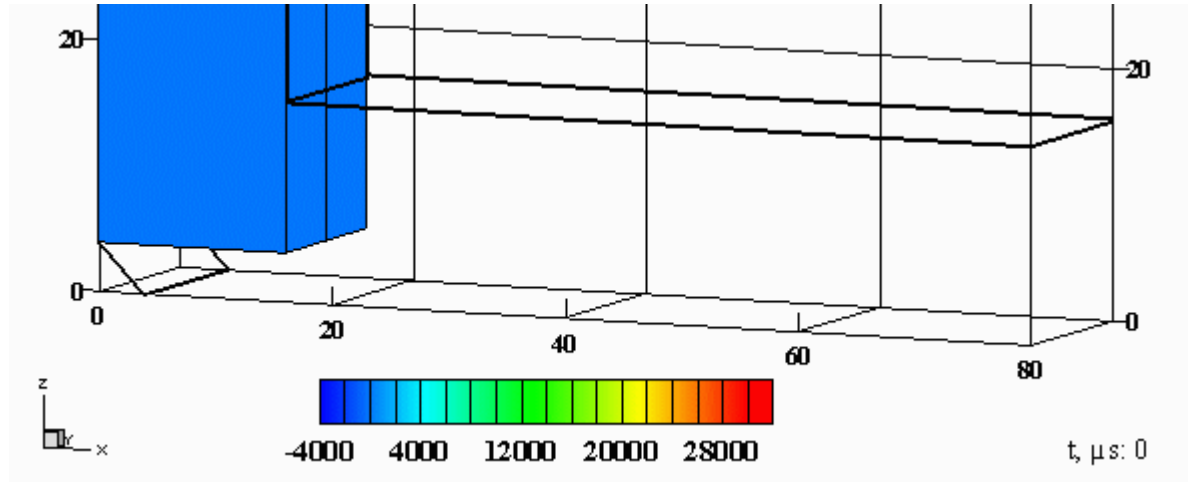
Эквивалентная  
скорость  
пластических  
деформаций



Эквивалентная  
пластическая  
деформация

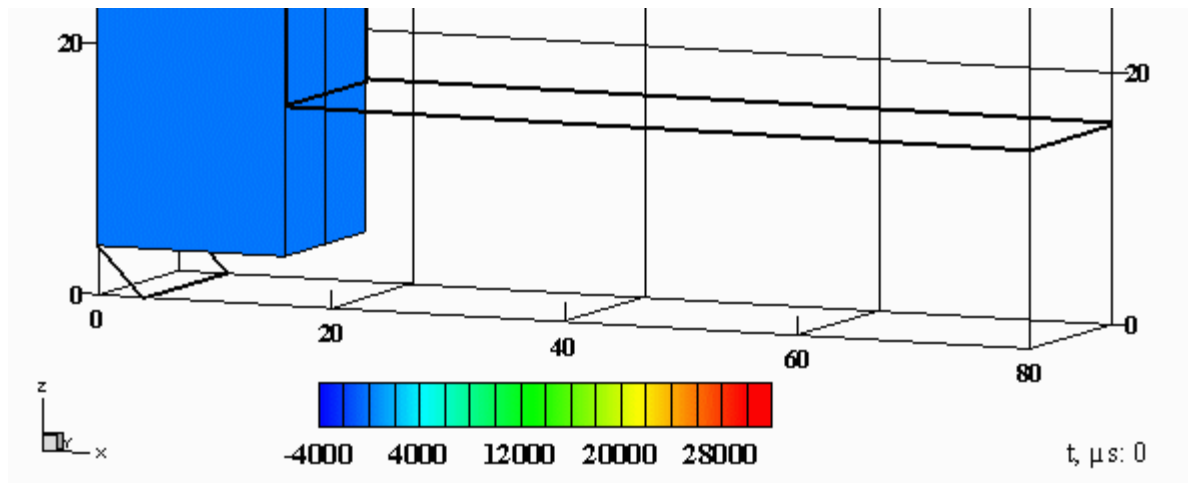
$$v_0 = 70 \text{ м/с}, P = 0.5 \text{ ГПа}$$

## Параметры процесса

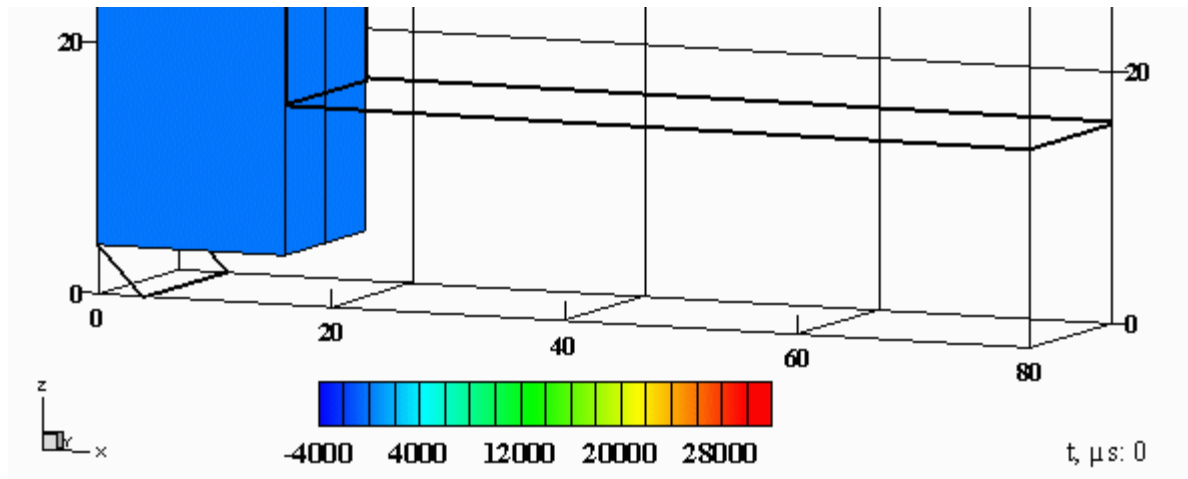


$v_0 = 70 \text{ м/с}, P = 0.5 \text{ ГПа}$

## Параметры процесса



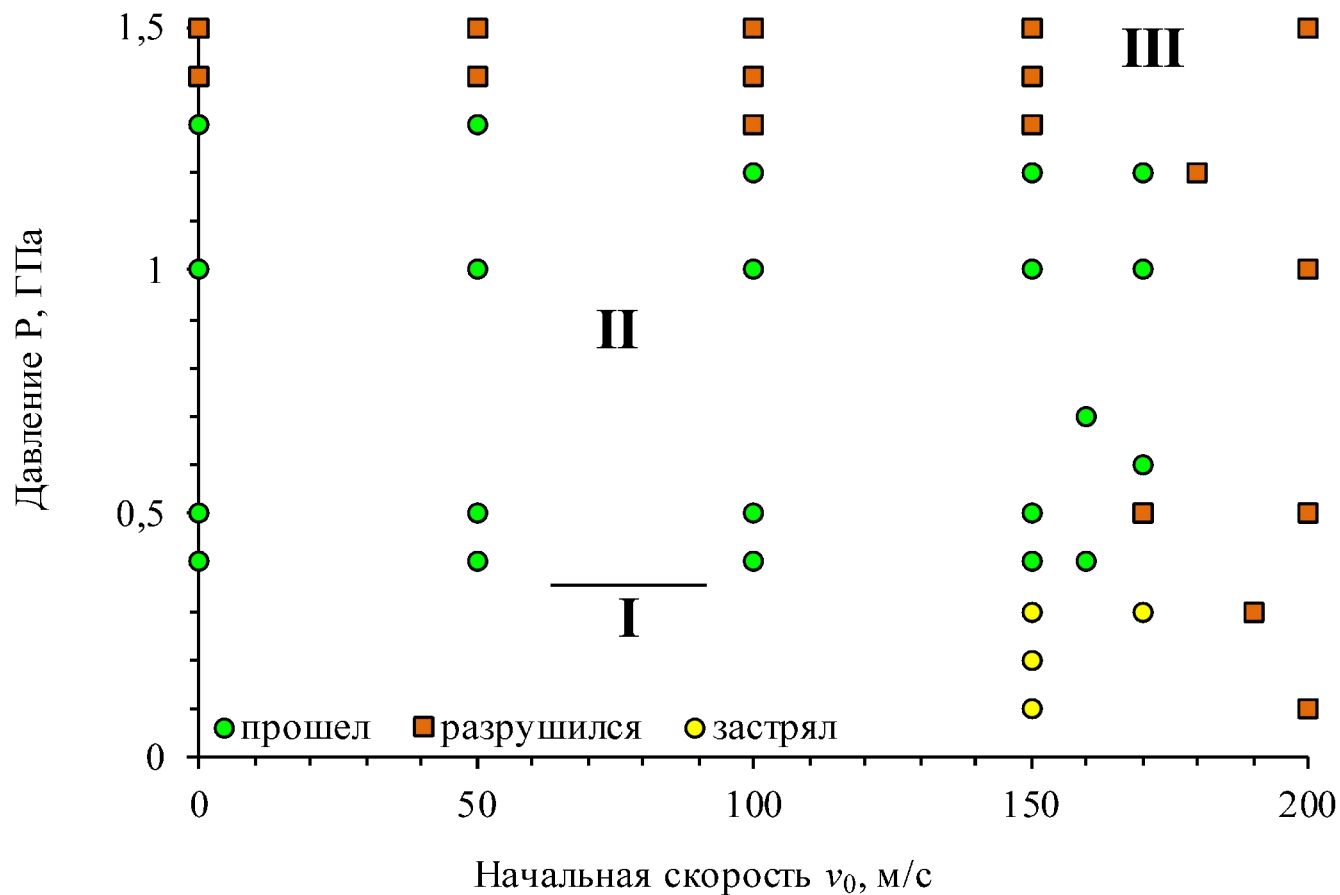
давление, ГПа



удельный объем  
микрповреждений,  
см<sup>3</sup>/г

$$v_0 = 70 \text{ м/с}, P = 0.5 \text{ ГПа}$$

## Диаграмма процесса ДКУП медного образца



- Разработана методика численного моделирования в трехмерной постановке на основе метода конечных элементов для исследования процессов ДКУП металлических образцов.
- Адекватность используемой физико-математической модели и методики расчета подтверждена на примере решения задачи Тейлора с максимальным отклонением от экспериментальных данных в 2,5%.
- Сходимость результатов расчетов показана на примере интегральных параметров процесса ДКУП – кинетической и полной энергии образца. Выбрана оптимальная расчетная сетка для решения поставленной задачи.
- Изучены закономерности интенсивного пластического деформирования медного образца сечением 16x16 мм и длиной 65 мм при динамической схеме нагружения в диапазоне приложенного к образцу давления до 1,5 ГПа, скорости образца 0-200 м/с при варьировании размера наклонной площадки в области пересечения каналов.