

23. Численное моделирование откольного разрушения металлов. Фракталы в прикладной физике. Б.Л. Глушак, И.Р. Трунин, С.А. Новиков, А.И. Рузанов. Арзамас -16. 1995. С.59-122.
24. Y. Chen, H. Hu, Y. Wang, Q. Li. Experimental study of ejecta on lead surface under shock melting. XI Забабахинские научные чтения, РФЯЦ-ВНИИТФ, 16-20 апреля, Снежинск, 2012. Сборник материалов, -406с. Тезисы докладов, с. 24.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕДИ МЕТОДОМ СОСТАВНЫХ СТЕРЖНЕЙ ГОПКИНСОНА

*А.Ю. Гармашев, С.М. Долгих, А.И. Клёнов, Е.А. Петухов,
К.С. Сидоров, Е.Б. Смирнов, М.А. Шестириков, Д.Т. Юсупов*

РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, Россия

Исследования динамического деформирования материалов ведутся более полувека, однако результатами таких исследований являются различные, зачастую труднодоступные характеристики. Надежность и возможность сравнения результатов исследований определяется, в первую очередь, научной обоснованностью постановки высокоскоростных испытаний материалов. Одним из методов имеющих ясные теоретические основы, высокую эффективность, универсальность и надёжность полученных результатов является метод составных стержней Гопкинсона (ССГ) или метод Кольского [1]. Данный метод относится к классу испытаний с постоянной скоростью деформации $\dot{\epsilon} = \text{const}$ и позволяет исследовать динамические диаграммы сжатия и растяжения при скоростях деформации $\dot{\epsilon} = 10^2 - 10^4 \text{ с}^{-1}$.

Описание установки

Принцип действия установки основан на разгоне цилиндрического ударника (сталь, титан, сплав алюминия и др.) длиной от 200 до 500 мм сжатым воздухом, накаченным в камеру высокого давления. Давлением воздуха разгоняется боек, который ударяет по торцу составного стержня Гопкинсона, возбуждая волну сжатия. Стержень Гопкинсона представляет собой два стержня из высокопрочной стали с пределом текучести более 2400 МПа с помещенным между ними образцом исследуемого материала. Деформации стержней измеряются тензодатчиками, наклеенными на нагружающий и опорный мерные стержни. Схема установки приведена на рисунке 1.

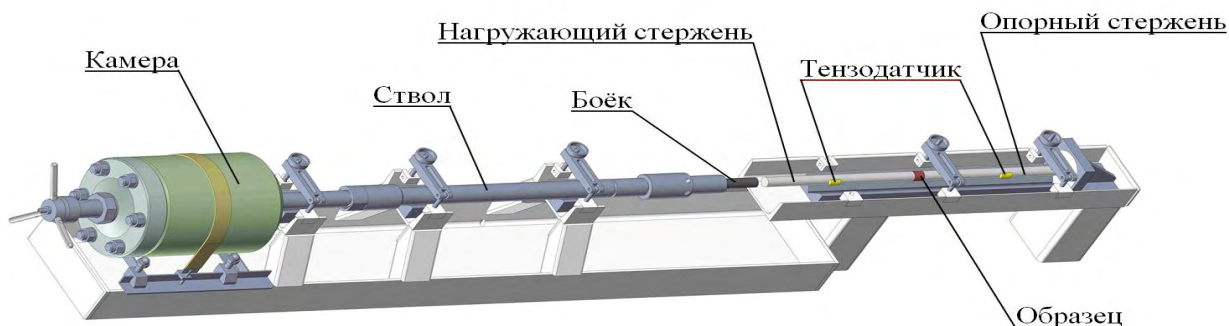


Рисунок 1. Схема установки ССГ

В соответствии с теорией [1] при выводе соотношений для расчета напряжения σ и деформации ϵ образца предполагается, что время прохождения волны по длине образца

существенно меньше длительности нагружающего импульса и напряженно-деформированное состояние образца близко к однородному. Поэтому процесс упругопластического деформирования образца является стационарным (подобен квазистатическому), но протекающим с высокими скоростями деформации (до $\sim 10^4$ с⁻¹).

Параметрические зависимости $\sigma(t)$, $\varepsilon(t)$ $\dot{\varepsilon}(t)$ в образце определяются на основе экспериментальных записей упругой деформации в нагружающей $\varepsilon_I(t)$ и проходящей $\varepsilon_T(t)$ волнах напряжения (соответственно, в нагружающем и опорном стержнях) по следующим формулам [2]:

$$\sigma(t) = \frac{ES}{S_S^0} [\varepsilon_T(t)]; \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{2C}{L_0} \int_0^t [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_T(t)] \cdot dt; \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{2C}{L_0} (\varepsilon_I(t) - \varepsilon_T(t)), \quad (3)$$

где S_S^0 – исходная площадь поперечного сечения образца, S – площадь поперечного сечения мерных стержней, E – модуль упругости материала мерных стержней, C – скорость продольных волн в стержнях, L_0 – первоначальная длина образца. Исключив параметр, время t , строятся диаграммы деформирования σ - ε образца и зависимости скорости деформации от деформации $\dot{\varepsilon} \sim \varepsilon$.

С помощью установки можно исследовать диаграммы сжатия, растяжения, локализованный сдвиг, трещиностойкость, эффект Баушингера и другие характеристики материалов при скоростях деформации $\dot{\varepsilon} \sim 10^2$ - 10^4 с⁻¹. Смена вида испытаний в установках стержней Гопкинсона достигается достаточно просто. Для этого требуется применить другие типы образцов и стержни с измененной геометрией в месте крепления образца. Нагружение и способ регистрации упругих деформаций стержней остаются такими же. При необходимости можно проводить исследования деформационно-прочностных характеристик конструкционных материалов по методу Тейлора при скоростях деформации $\dot{\varepsilon} \sim 10^4$ - 10^5 с⁻¹. В этом случае небольшое отличие узлов установки заключается в том, что с помощью пневматической системы разгоняется сам образец, который ударяется о стержень и деформируется (при необходимости до разрушения).

Метод измерений

В схеме испытаний деформации в волнах напряжения в нагружающем и опорном мерных стержнях измеряется с помощью фольговых тензорезисторов стандартного типа. Тензорезисторы (см. рисунок 1) наклеиваются на образующую поверхность на расстоянии 4-5 диаметров от торца нагружения (нагружающий стержень) или от торца касания с образцом (нагружающий и опорный стержень).

Для компенсации изгибных колебаний в стержнях и увеличения амплитуды полезного сигнала в рабочих сечениях наклеено по 2 соединенных последовательно тензорезистора. Поскольку в процессе испытания регистрируется только динамическая составляющая деформаций, для питания тензорезисторов выбрана потенциометрическая схема ввиду её простоты и возможности питания нескольких измерительных каналов от одного источника. Обе группы (тензорезисторов на опорном и нагружающем стержнях) питаются постоянным током от стандартного стабилизированного блока питания через оригинальные схемы питания и калибровки. Сигналы с датчиков регистрируются запоминающим осциллографом.

Результаты исследований

В ходе исследований проведено 10 опытов с образцами меди $\varnothing 10 \times 5$ мм. Скорость ударника составила 12,3-17,9 м/с, скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ составила 2030-2850 с⁻¹.

На рисунке 2 приведена типичная осциллограмма импульсов деформаций в одном из опытов.

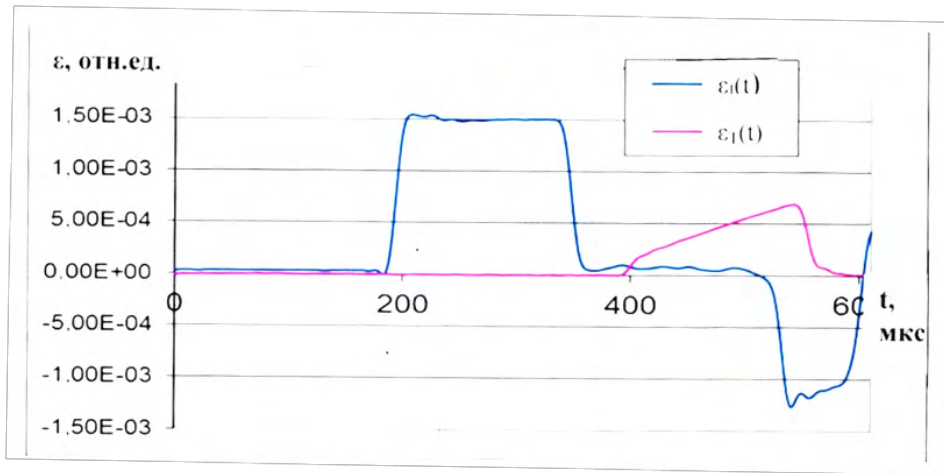


Рисунок 2. Типичная осциллограмма импульсов деформации нагружающей $\varepsilon_n(t)$ и проходящей $\varepsilon_p(t)$ волнах напряжения в одном из опытов

Образцы в экспериментах деформировались пластически без разрушения, уменьшаясь по высоте на 1,5-2,4 мм (см. рисунок 3).

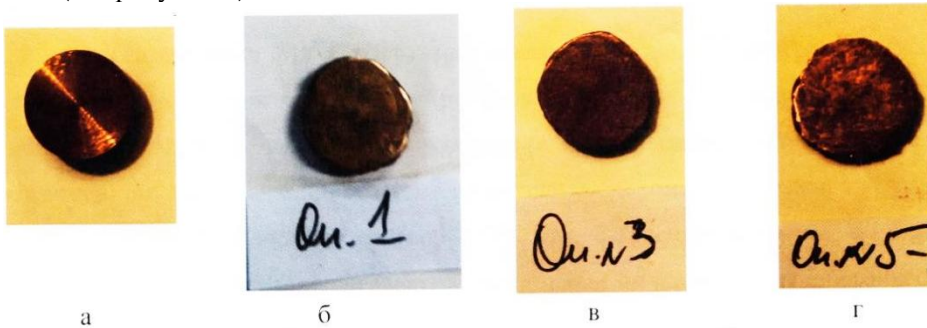


Рисунок 3. Вид исходного и испытанных образцов при разных скоростях деформации $\dot{\varepsilon}$: б – 2150 с⁻¹, в – 2100 с⁻¹, г – 2360 с⁻¹

Профиль испытанных образцов со стороны торцов был в виде неправильной окружности с разбросом наименьшего и наибольшего диаметров от 12 до 15 мм.

На рисунке 4 приведены диаграммы σ - ε всей серии опытов по динамическому сжатию меди.

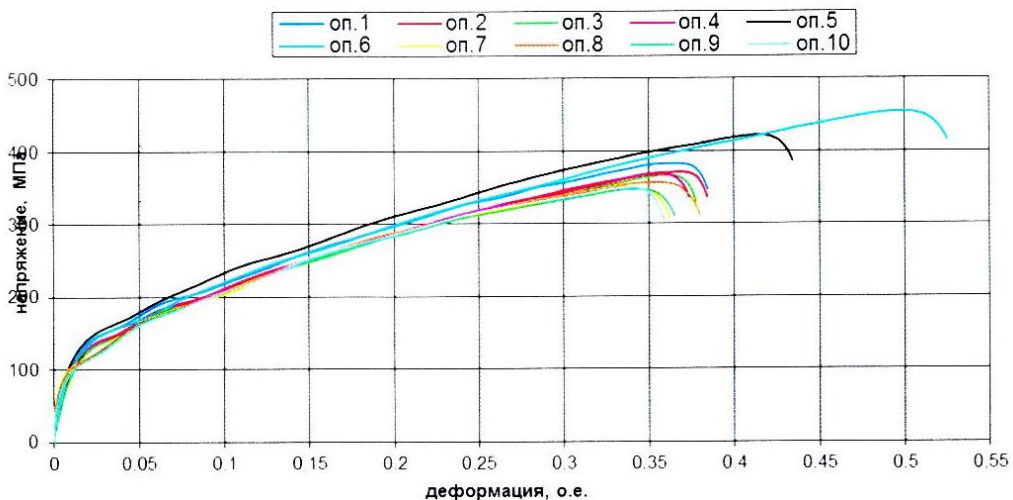


Рисунок 4. Диаграммы σ - ε всей серии опытов

Анализ результатов

Из рисунка 4 видно, что при разных скоростях деформации диаграммы σ - ε мало отличаются друг от друга, обладая приблизительно одинаковым деформационным упрочнением. Диаграммы опытов № 1-4, 7-10 получены при $\dot{\varepsilon} = 2030$ – 2160 с⁻¹, а диаграммы опытов № 5 и № 6 – при $\dot{\varepsilon} = 2360$ с⁻¹ и 2850 с⁻¹, однако в целом они отличаются лишь увеличенным значением остаточного укорочения при более высоких $\dot{\varepsilon}$: $\varepsilon_{ост.} = 31$ – 33 % в опытах № 1-4, 7-10 и $\varepsilon_{ост.} = 40$ % и 48 % в опытах № 5 и № 6.

Результаты всей серии опытов с медью представлены в таблице 1. В таблице кроме скорости деформации и величины остаточного укорочения, приведены найденные из диаграмм величины пределов текучести $\sigma_{0,2}$ для каждого опыта.

Таблица 1. Результаты опытов

№ опыта	Скорость деформации $\dot{\varepsilon}$, с ⁻¹	Остаточное укорочение $\varepsilon_{ост.}$, %	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа
1	2150	32,0	68,5
2	2100	31,5	66,2
3	2100	31,0	64,0
4	2060	31,0	65,3
5	2360	40,0	73,0
6	2850	48,0	70,0
7	2080	32,3	62,8
8	2160	34,0	65,0
9	2080	32,5	71,2
10	2030	32,0	67,0

Для численного моделирования широко используются эмпирические определяющие соотношения, в которых поверхность текучести представляется функцией деформации ε , скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ и температуры T :

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T). \quad (4)$$

Чаще всего используют упрощенную аддитивную или мультипликативную форму этой функции:

$$\begin{aligned} \sigma &= f_1(\varepsilon, T), \\ \sigma &= f_1(\varepsilon, T) f_2(\dot{\varepsilon}, T) f_3(T) + f_2(\dot{\varepsilon}, T). \end{aligned} \quad (5)$$

В большинстве моделей эффекты скоростного упрочнения и температурного разупрочнения считаются независимыми и представляются отдельными множителями:

$$\sigma = f_1(\varepsilon) f_2(\dot{\varepsilon}) f_3(T). \quad (6)$$

Как правило, функция f_1 представляет собой линейную комбинацию степенных или экспоненциальных функций от ε [3].

Самой распространенной моделью, применяемой в динамических расчетах, является модель Джонсона–Кука (JC) [4]. Модель JC материала с изотропным упрочнением связывает эквивалентные напряжения Мизеса с эквивалентной пластической деформацией ε и скоростью деформации $\dot{\varepsilon}$ выражением:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + D \ln \dot{\varepsilon})(1 - T^{*m}), \quad (7)$$

где σ – напряжение, ε_p – пластическая деформация, $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, A – предел текучести, B – характеристика упрочнения, D – постоянная упрочнения за счёт скорости деформации, n – показатель упрочнения, m – коэффициент температурной зависимости, $T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$, T – абсолютная мгновенная температура образца, равная сумме начальной абсолютной температуры испытания T_{room} и приращению температуры образца при его

пластическом деформировании (рассчитывается через энергоемкость), T_{melt} – температура плавления.

В данной работе, при аппроксимации температурный член в уравнении (7) не учитывался. Весь набор данных, полученных в экспериментах, аппроксимировалась уравнением (7) методом нелинейной регрессии по алгоритму Левенберга-Макверта. Результаты аппроксимации приведены на рисунке 5

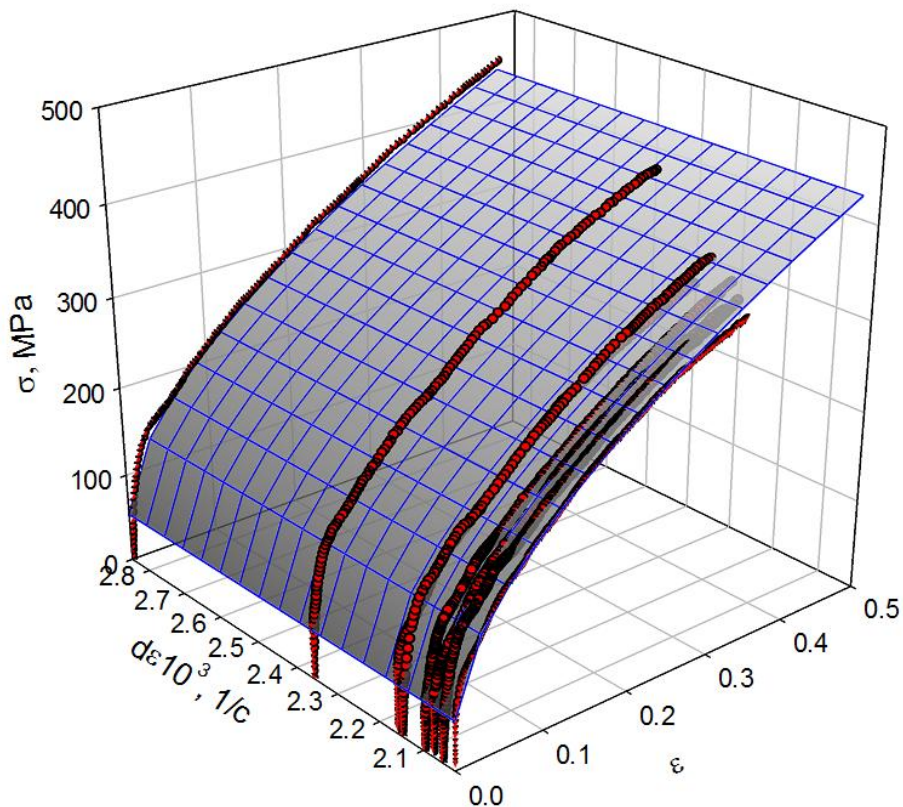


Рисунок 5. Диаграмма $\sigma = f_1(\varepsilon)f_2(\dot{\varepsilon})$ деформирования меди

На рисунке 5 приведены экспериментальные данные и аппроксимирующая поверхность (7). В результате аппроксимации были получены следующие значения аппроксимирующих параметров: $A - 50 \pm 6$ МПа, $B - 544 \pm 66$ МПа, $D - 0,01$, $n - 0,572 \pm 0,006$.

Можно ожидать, что использование полученного определяющего уравнения в форме Джонсона-Кука позволит повысить точность описания динамического деформирования меди при численном моделировании ударно-волновых процессов.

Список литературы

1. Кольский Г. Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения.// Механика, 1950, выпуск 4, с. 108-128.
2. Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф. и др. Динамика удара.// М.: Мир, 1985, с. 296.
3. Patrick L. Strain rate sensitivity of automotive sheet steels: influence of plastic strain, strain rate, temperature, microstructure, bake hardening and pre-strain.// Genehmigte Dissertation, April 2010.
4. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures// Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistic. Hague, Netherlands, 1983. P. 541-547.