

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ФРАГМЕНТОВ РАЗРУШЕНИЯ ТУГОПЛАВКОГО НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СИЛИКАТНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ

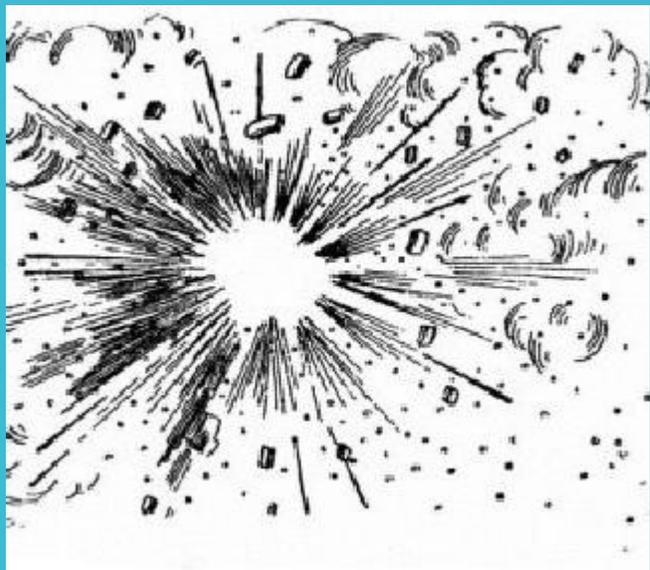
*Авторы: Игнатова А.М., Наймарк О.Б., Юдин М.В.,
Воронов В.Л., Игнатов М.Н.*



ИМСС УрО РАН

**Для тугоплавких
неметаллических
материалов
характерны только
первые три из
перечисленных**





При достаточной кинетической энергии ударника в процессе фрагментации формируется осколочное поле

Осколочное поле как единый объект, обладающий собственными характеристиками:

- скорость распространения (часто принимается скорость лидирующего осколка);
- угол конуса разлёта осколочного поля;
- эквивалентная площадь воздействия осколка;
- распределение осколков по массе и флюенс осколочного поля.

Перечисленные параметры осколочного поля не дают представления о скорости отдельных фрагментов!

Индивидуальная скорость фрагментов разрушения после удара необходима для оценки риск повреждения ими людей или объектов.

Существующие подходы к прогнозированию скорости фрагментов

$$V_t = V \frac{\rho_j U_j}{\rho_j U_j + \rho_t U_t}$$

V_1 – скорость контактной поверхности между ударником и неподвижной мишенью в момент удара,
 ρ_j, ρ_t - плотность материала ударника и поверхности соответственно,
 U_j, U_t - скорость частиц материала ударника и мишени соответственно.

$$V = \frac{1}{M} \sqrt{M_1^2 V_1^2 + 2M_1 M_2 V_1 V_2 \cos \varphi + M_2^2 V_2^2}$$

скорость каждого фрагмента $m_{\alpha j}$ в момент удара (разрушения частиц) складывается из скорости V , определяемой из уравнения и скорости разлета $v_{j\alpha}$ от точки соударения

V – общая скорость двух частиц после соударения;

V_1 – скорость первой частицы до соударения;

V_2 – скорость второй частицы до соударения;

M_1 – масса первой частицы до соударения;

M_2 – масса второй частицы до соударения;

M – общая масса двух частиц;

φ – угол соударения частиц.

Целью представленной работы является экспериментальное определение скорости фрагментов разрушения при ударе по тугоплавкому неметаллическому силикатному материалу.

Для расчета $v_{j\alpha}$ предложено уравнение, которое имеет частное решение для случая, когда скорость всех фрагментов одинаковая

$$(1 - k)E_j^\alpha = \sum_{j=1}^{K_\alpha} \frac{m_j^\alpha (v_j^\alpha)^2}{2} N_j^\alpha,$$

$$v_j^\alpha = \sqrt{2(1 - k)e_\alpha},$$

k – доля упругой энергии, затрачиваемой на разрушение,
 e – упругая энергия частицы.

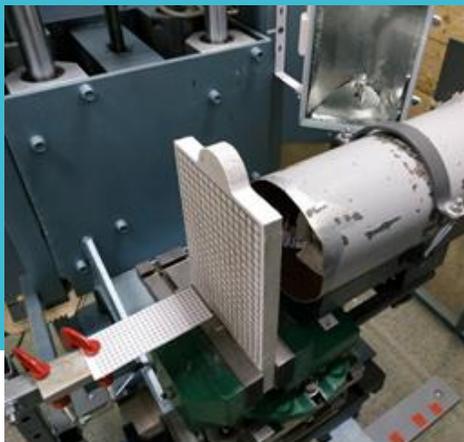
Данный подход определяет начальную скорость, но не позволяет оценить ее развитие во времени.

Вышеупомянутые работы ориентированы прежде всего на металлические материалы.

$\text{KMg}_3[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}]\text{F}_2$



280x160x15 мм (с учетом 70 мм для крепления в держателе установки).



Материалы и методы

Плотность 2,8-2,9 г/см³;

Состав, мас. %:

SiO_2 – 39-43,

Al_2O_3 – 9-12,

MgO – 27-30,

K_2O – 7-9,

F – 9-12.

Предел прочности при сжатии калиевого фторфлогопита зависит от протяженности слоистых структурных составляющих, при величине протяженности 50-300 мкм этот показатель изменяется в диапазоне от 50 до 10 МПа соответственно.

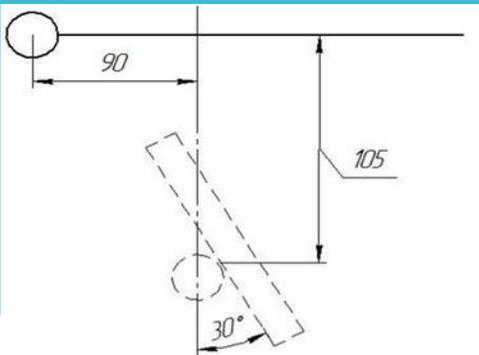
Для наглядности результатов экспериментов образцы были покрыты вододисперсионной краской белого цвета, на поверхность образцов была нанесена разметочная сетка с размером ячейки 10x10 мм.

В качестве метающего тела использовался стальной шарик (Сталь 20) диаметром 23 мм.

Максимальная скорость съемки камеры составила 775 000 к/с при разрешении 128x24 pixels;

Стальной шарик разгоняли в трубе с внутренним диаметром 25 мм и длиной 3950 мм с помощью пневмооборудования, использовали насос с ресивером высокого давления объемом 5,2 л.

Было поставлено 4 эксперимента по удару со следующими параметрами: скорость шарика 230 м/с угол соударения 90°; скорость шарика 120 м/с угол соударения 90 °; скорость шарика 230 м/с угол соударения 30°; скорость шарика 120 м/с угол соударения 30°



Материалы и методы

Скорость фрагментов разрушения определяли по видеозаписи, полученной с помощью высокоскоростной камеры Photron Fastcam SA5

Видеозапись обрабатывали методом анализа покадровых изображений с помощью программного продукта ImageJ-Fiji (модуль TrackMate).

Для учета индивидуальных особенностей фрагментов разрушения в ходе анализа покадровых изображений был установлен размерный диапазон фрагментов также с использованием программного продукта ImageJ-Fiji (модуль Analyze particles).



Пневматическая установка для разгона стального ударника

Кадры из записей
фрагментации мишеней
из калиевого
фторфлогопита при
ударе стальным
шариком:

а – со скоростью 230 м/с,
угол соударения 90° ;
б – со скоростью 120 м/с,
угол соударения 90° ;
в – воздействие со
скоростью 230 м/с, угол
соударения 30° ;
г – воздействие со
скоростью 120 м/с, угол
соударения 30°

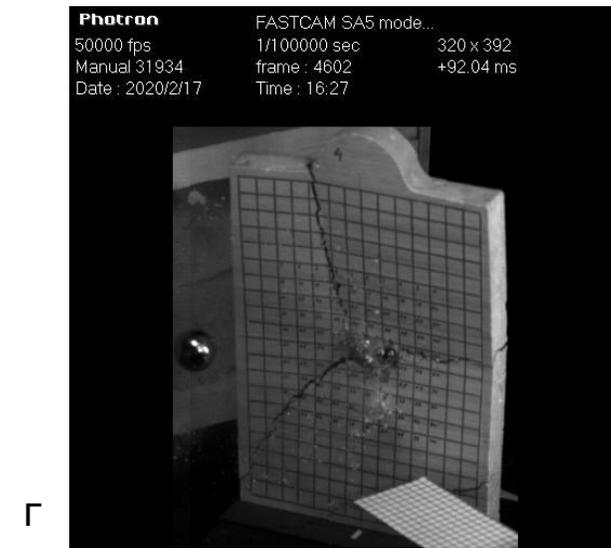
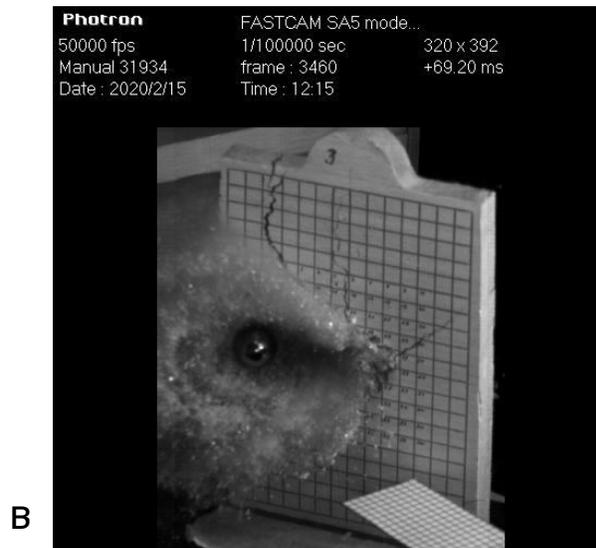
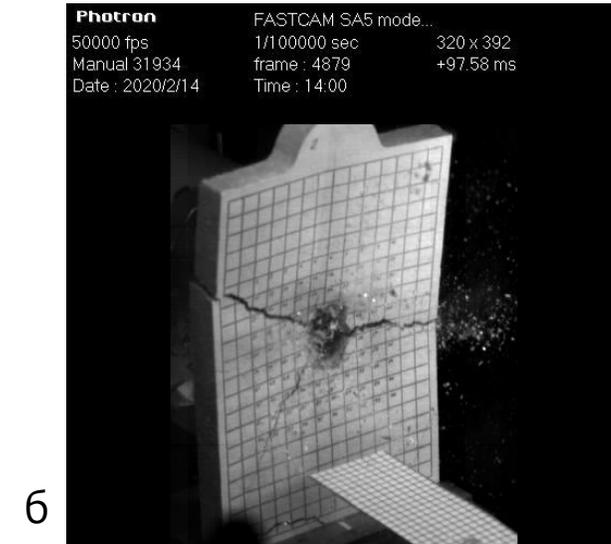
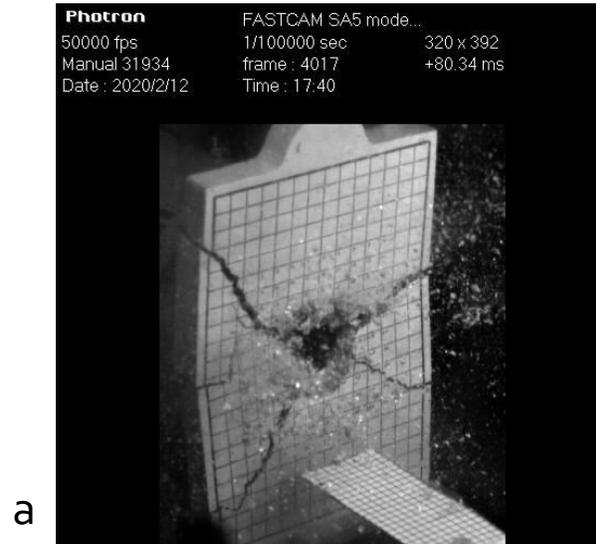


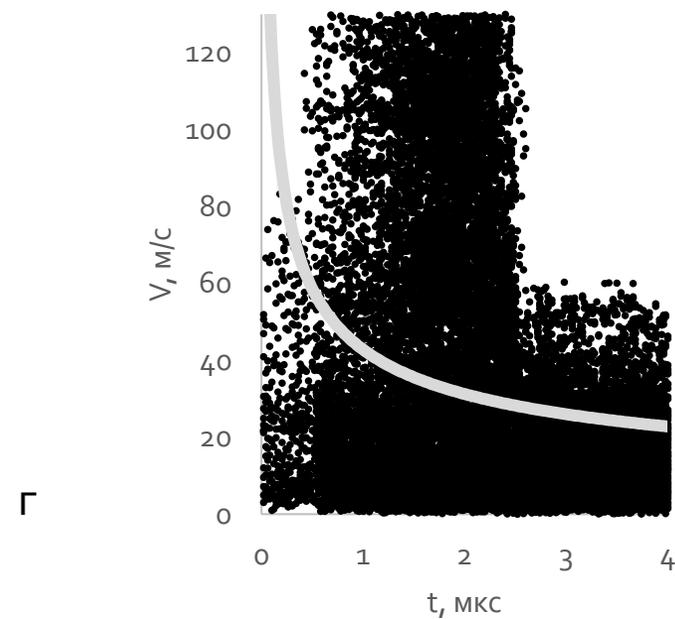
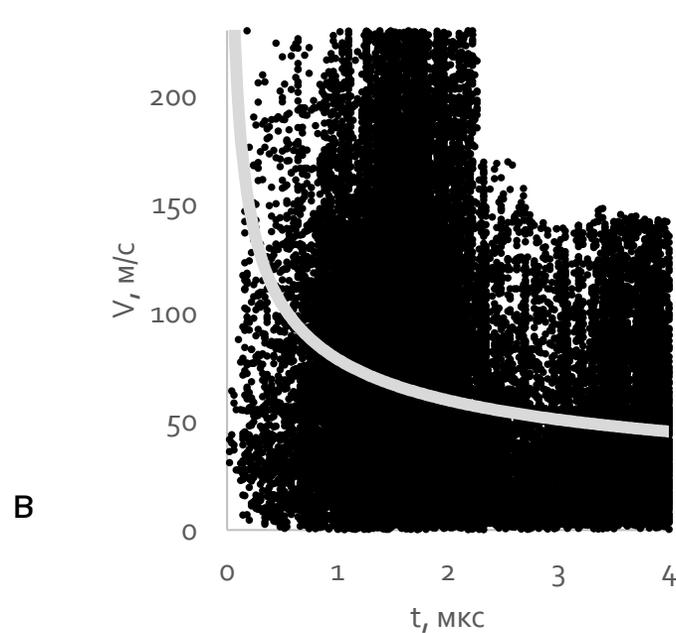
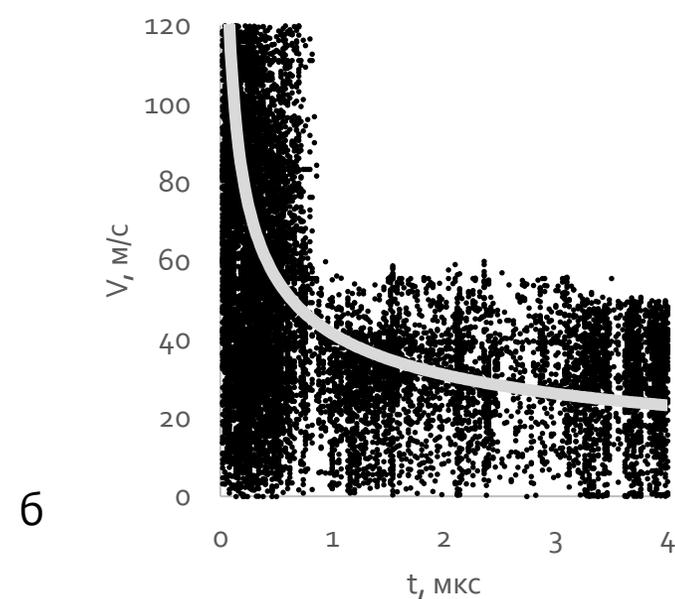
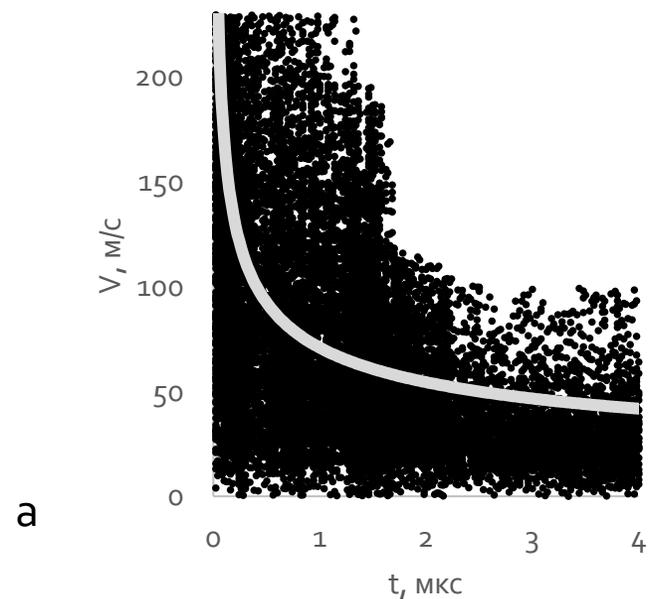
Диаграмма изменения скорости фрагментов разрушения мишени из калиевого фторфлогопита при ударе стальным шариком:

а – со скоростью 230 м/с, угол соударения 90° ;

б – со скоростью 120 м/с, угол соударения 90° ;

в – воздействие со скоростью 230 м/с, угол соударения 30° ;

г – воздействие со скоростью 120 м/с, угол соударения 30°



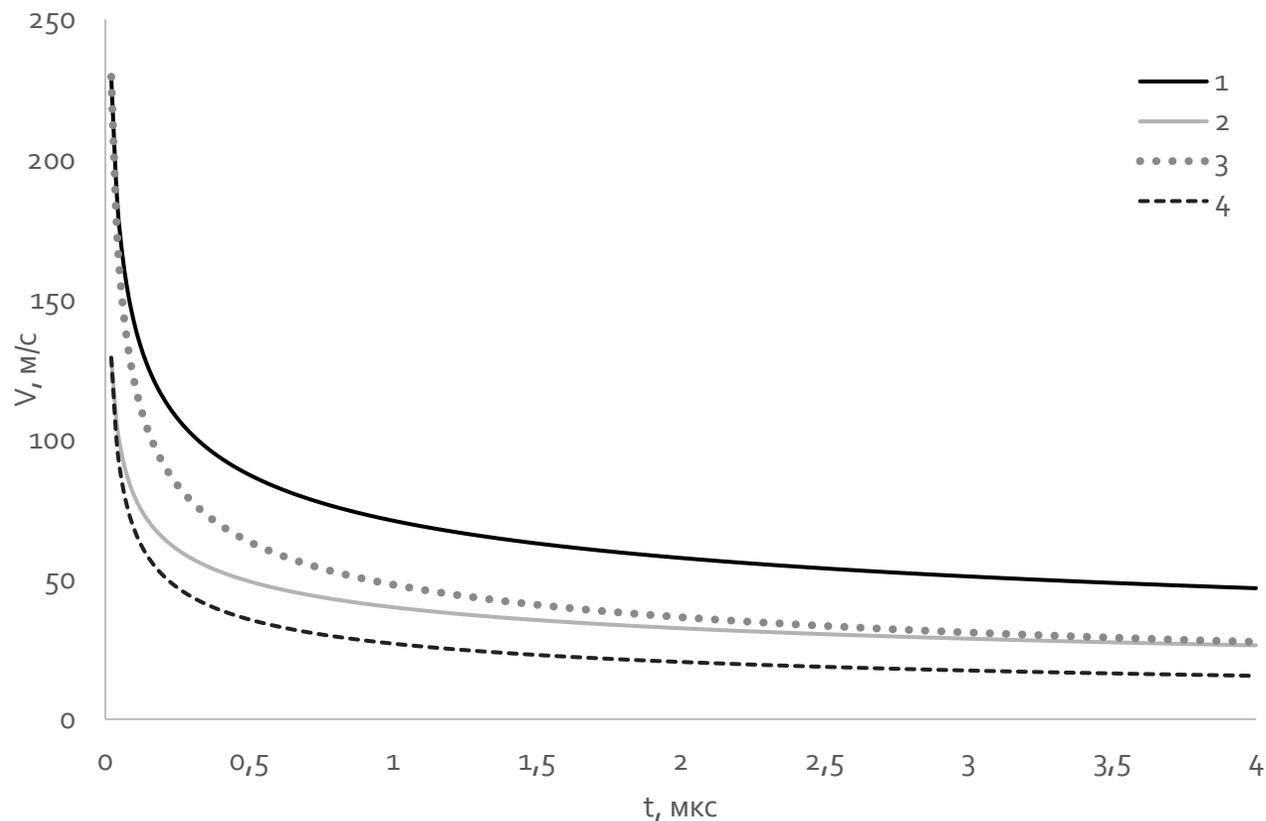
Усредненные зависимости изменения скорости фрагментов разрушения мишени из калиевого фторфлогопита при ударе стальным шариком:

1 – со скоростью 230 м/с, угол соударения 90°;

2 – со скоростью 120 м/с, угол соударения 90°;

3 – воздействие со скоростью 230 м/с, угол соударения 30°;

4 – воздействие со скоростью 120 м/с, угол соударения 30°



Скорость ударника, м/с	Угол соударения, °	Средний размер фрагмента, мм	Минимальный размер фрагмента, мм	Максимальный размер фрагмента, мм	Кинетическая энергия фрагментов, Дж
230	90	3,47	2,37	5,09	27-78
120	90	2,36	1,80	3,03	24-45
230	30	3,37	2,75	4,31	52-81
120	30	3,99	3,08	5,15	17-24

Выводы:

- экспериментально установлены скорости отдельных фрагментов разрушения;
- выявлено, что характер изменения скорости фрагмента относительно времени соответствует гиперболической функции и зависит от кинетической энергии фрагментов;
- предложены коэффициент для расчета изменения скорости фрагментов разрушения калиевого фторфлогопита относительно времени.

Скорость фрагмента разрешения:

$$V = k_1 \cdot t^{-k_2},$$

в которой первый коэффициент k_1 может быть выражен через кинетическую энергию осколка (E_k) в начальный момент времени умноженный на масштабный фактор (M), который по данным эксперимента составляет 20 для лобового удара и 2 для удара под углом 30° , а второй коэффициент k_2 – через угол соударения и соответствует по полученным кривым 0,3 для удара под углом 90° и 0,4 для удара под углом 30° . Уравнения функции можно записать как:

$$V = ME_k \cdot t^{-k_2};$$

Установленные значения коэффициентов достоверны для материала, рассмотренного в эксперименте, и не могут экстраполироваться на другие материалы без предварительного анализа.