

PACS: 62.20.-x, 61.43.-j

Б.А. Урюков, Г.В. Ткаченко

МЕТОД РАСЧЕТА УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ СОУДАРЕНИИ С МИШЕНЬЮ

Институт проблем материаловедения НАН Украины
ул. Кржижановского, 3, г. Киев, 13142, Украина

Статья поступила в редакцию 3 апреля 2012 года

Рассмотрена физико-математическая модель образования фрагментов и получены выражения для энергии, затрачиваемой на фрагментацию зерен и диссипацию энергии деформации. Метод расчета фрагментации, деформации и упрочнения металлической частицы при ударе о мишень основан на уравнении сохранения энергии с использованием следствий, вытекающих из рассмотренной модели. Показано, в частности, что существует минимальная скорость удара, ниже которой фрагментация отсутствует во всем объеме частицы. Получены алгебраические уравнения для определения зависимости таких характеристик, как максимальное напряжение на контакте, максимальная деформация, минимальный и средний размеры фрагментов, максимальная и средняя величины модуля линейного упрочнения, от скорости удара и свойств материала. Приведены примеры расчетов искомых параметров.

Ключевые слова: объемные наноматериалы, высокоскоростной удар, пластическая деформация, фрагментация зерен металлических материалов, модуль линейного упрочнения, диссипация механической энергии

Розглянуто фізико-математичну модель утворення фрагментів та отримано вирази для енергії, що витрачається на фрагментацію зерен і дисипацію енергії деформації. Метод розрахунку фрагментації, деформації та зміцнення металеві частинки при ударі по мішені заснований на рівнянні збереження енергії з використанням наслідків, що випливають з розглянутої моделі. Показано, зокрема, що існує мінімальна швидкість удару, нижче якої фрагментація відсутня у всьому об'ємі частинки. Отримано алгебраїчні рівняння для визначення залежності таких характеристик, як максимальне напруження на контакті, максимальна деформація, мінімальний і середній розміри фрагментів, максимальна й середня величини модуля лінійного зміцнення, від швидкості удару й властивостей матеріалу. Наведено приклади розрахунку шуканих параметрів.

Ключові слова: об'ємні наноматеріали, високошвидкісний удар, пластична деформація, фрагментація зерен металевих матеріалів, модуль лінійного зміцнення, дисипація механічної енергії

Введение

Высокоскоростной удар металлической частицы о твердую мишень сопровождается не только ее сильной деформацией, достигающей десятков процентов за очень короткое (10^{-6} – 10^{-7} s) время, но и дроблением зерен вплоть до образования наноструктур, что наблюдается в технологическом процессе «холодного» газодинамического напыления [1–4]. Эффект дробления сопровождается упрочнением материала, и его можно использовать для получения объемных наноматериалов. В этом плане представляет интерес оценка степени фрагментации зерен при ударе.

В данной работе предложена модель образования фрагментов зерен металлической частицы, ее деформации и упрочнения при высокоскоростном соударении с твердой мишенью. Модель основана на «элементарной» одномерной теории упругого удара Кильчевского [5], адаптированной в работе [6] к анализу пластической деформации металлической частицы в процессе ее сцепления с твердой основой.

Модель деформации частицы

Как и в работе [6], частицу будем моделировать в виде цилиндра с начальной высотой H_0 , форма которого сохраняется в процессе деформации при ударе о плоскую стенку. Материал подчиняется модели линейно-упрочняемого тела, причем при больших напряжениях сжатия, характерных для высокоскоростного удара, зависимость локальной пластической деформации от напряжения имеет вид, подобный закону Гука:

$$\frac{d\delta_l}{dz} = \frac{\sigma}{E_d}, \quad (1)$$

где $d\delta_l$ – изменение толщины диска с исходной толщиной dz (разность толщин исходного и деформированного дисков); E_d – модуль линейного упрочнения материала; z – координата, направленная от свободного торца частицы к площадке контакта; σ – напряжение сжатия, которое принимается линейно-распределенным по высоте частицы:

$$\sigma = \sigma_c \frac{z}{H}, \quad (2)$$

где H – высота частицы, σ_c – напряжение на контакте.

Процесс деформации частицы при ударе о поверхность мишени изучался в [6] на основе уравнения сохранения энергии. Принималась во внимание только работа деформации, причем в основном пластической, поскольку энергия упругой деформации при высокоскоростном ударе очень мала в сравнении с ней.

Процесс фрагментации зерен при интенсивной деформации также можно рассчитать с помощью уравнения сохранения энергии, но для этого необходимо знать величину работы, затрачиваемой на дробление зерен.

Оценка работы фрагментации зерен при деформации

Пусть зерно в виде кубика со стороной D (рис. 1) при воздействии деформирующего напряжения распадается на N^3 фрагментов в виде кубиков со стороной d_f . Количество вновь образующихся границ между фрагментами составляет $3(N - 1)N^2$. Число элементарных кристаллических ячеек на поверхности каждой новой площадки равно отношению d_f^2 / a^2 , где a – параметр решетки. Обозначим через Q_a энергию разрушения связи между близлежащими атомами кристаллической решетки, тогда работа образования фрагментов в одном зерне будет равна

$$3(N - 1)N^2 n Q_a \frac{d_f^2}{a^2},$$

где n – количество атомов на грани элементарной кристаллической ячейки (для ГЦК-решетки $n = 2$).

Работа образования фрагментов, приходящаяся на единицу объема материала, A_{f1} равна указанной величине, отнесенной к объему зерна D^3 . Таким образом, поскольку $D = Nd_f$, будем иметь

$$A_{f1} = 3 \left(1 - \frac{d_f}{D} \right) \frac{n Q_a}{d_f a^2}. \tag{3}$$

Известна формула Пуарье [7] для размера субзерна в зависимости от местного напряжения сжатия:

$$d_f = K \frac{Gb}{\sigma}, \tag{4}$$

где K – коэффициент, G – модуль упругости, b – вектор Бюргера.

Воспользуемся уравнением (4) и учтем, что произведение Gb равно энергии nQ_a , отнесенной к площади грани элементарной кристаллической ячейки, т.е. $Gb = nQ_a/a^2$, а вектор Бюргера численно по порядку величины совпадает с параметром решетки.

Тогда можно получить

$$A_{f1} = \frac{3}{K} \left(1 - \frac{d_f}{D} \right) \sigma. \tag{5}$$

Общая энергия, затраченная на фрагментацию, равна сумме затрат во всем объеме V частицы:

$$A_f = \frac{3}{K} \int_V \left(1 - \frac{d_f}{D} \right) \sigma dV, \tag{6}$$

причем в тех областях, где расчет дает $d_f > D$, следует считать $A_f = 0$.

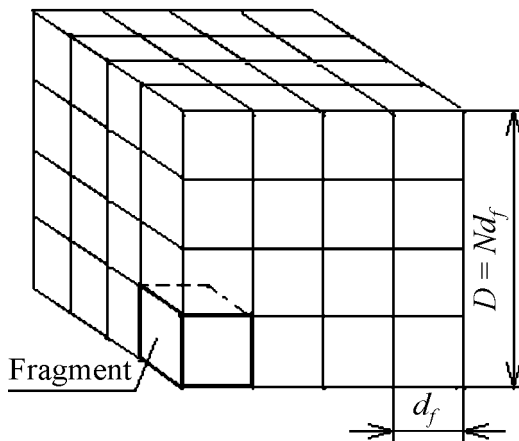


Рис. 1. Модель фрагментации зерна при воздействии деформирующего напряжения

Оценка диссипации энергии деформации

Диссипация энергии (превращение механической энергии в тепло) имеет место при сдвиговой деформации благодаря внутреннему трению. Имеющиеся сведения о возможности расчета диссипации относятся только к упругим телам [8]. В то же время отмечается, что диссипация кинетической энергии как в твердых телах, так и в жидкостях и газах, невелика [8,9].

Для оценки вклада диссипации в общий процесс пластической деформации и фрагментации рассмотрим вариант одноосного сжатия частицы, при котором наблюдается образование слоев, сдвигающихся друг относительно друга. Частицу моделируем в форме цилиндра высотой H и диаметром d . Зависимость скорости движения масс материала при сжатии примем в виде, удовлетворяющем уравнению неразрывности несжимаемой жидкости:

$$u = u_{p0} \left(1 - \frac{z^2}{H^2} \right), \quad v = u_{p0} \frac{z}{H} \frac{r}{H}, \quad (7)$$

где u_{p0} – скорость на свободном торце частицы; v, r – соответственно радиальная скорость и координата; u, z – соответственно вертикальная скорость и координата, отсчитываемая от свободного торца.

При движении слоев друг относительно друга между ними возникает трение, энергия которого переходит в тепло. Принимая, что слои плоские, найдем, что в любой точке i -й плоскости трения мощность трения $\dot{q}_i = k\sigma_i\Delta v_i$, где k – коэффициент трения; σ_i – напряжение сжатия; Δv_i – разность скоростей движения контактирующих слоев. Из уравнения (7) для v следует, что $\Delta v_i = u_{p0} \frac{D_i}{H} \frac{r}{H}$, где D_i – толщина одного слоя. Проинтегрировав по площади поверхности скольжения S , получим тепловую мощность, которая выделяется на ней:

$$\dot{A}_{di} = \frac{k}{3} u_{p0} S \frac{d}{H} \sigma_i \frac{D_i}{H}. \quad (8)$$

Чтобы найти полное количество мощности, необходимо просуммировать мощности по всем площадкам скольжения. Для этого заменим σ_i на $\sigma(z)$, а $\frac{D_i}{H}$ – на $\frac{dz}{H}$ и проинтегрируем по высоте частицы. Тогда в соответствии с (2) получим

$$\frac{dA_d}{dt} = \frac{kV}{6} \frac{\sigma_c u_{p0}}{H},$$

где V – объем частицы.

Поскольку $u_{p0} = \frac{d\delta}{dt}$ (где δ – линейная деформация частицы), для полной диссипативной энергии получаем выражение

$$A_d = \frac{kV}{6} \int_0^{\varepsilon_m} \sigma_c \frac{d\varepsilon}{1-\varepsilon}, \quad (9)$$

где $\varepsilon = \frac{\delta}{H_0}$ и ε_m – соответственно текущая и конечная деформации частицы.

Для оценки интеграла по максимуму воспользуемся результатами работы [6], где рассматривались затраты энергии удара только на деформацию частицы:

$$\varepsilon = \frac{\bar{\sigma}_c}{2 + \bar{\sigma}_c}, \quad \bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{E_d}.$$

Отсюда следует

$$A_d = \frac{kV}{3} E_d \left[\frac{\bar{\sigma}_{cm}}{2} - \ln \left(1 + \frac{\bar{\sigma}_{cm}}{2} \right) \right], \quad (10)$$

где $\bar{\sigma}_{cm}$ – значение относительного напряжения на контакте в момент окончания удара.

Оценка отношения A_d к кинетической энергии алюминиевой частицы показала, что в характерных для практики условиях (скорость $\geq \sim 300$ m/s) оно не превышает 2% и уменьшается с ростом скорости удара. Поэтому влияние диссипации на процессы фрагментации и деформации можно не учитывать.

Метод расчета деформации, фрагментации и упрочнения

Модуль линейного упрочнения, характеризующий прочность материала, должен изменяться вместе с изменением его структуры. Примем, что он изменяется аналогично изменению прочности в формуле Холла–Петча, т.е. пропорционально $d_f^{-1/2}$, полагая при этом, что постоянное слагаемое (по идее формулы отвечающее прочности на сдвиг чистого кристалла) при высокоскоростном ударе можно считать небольшим. Тогда

$$\frac{E_d}{E_{d0}} \approx \sqrt{\frac{D}{d_f}}, \quad (11)$$

где E_d, E_{d0} – модули упрочнения материала, соответственно подвергшегося силовому воздействию и исходного.

Уравнение сохранения энергии имеет вид

$$\frac{mu^2}{2} + U + A_f = \frac{mu_0^2}{2}, \quad (12)$$

где m – масса частицы; u_0, u – соответственно начальная и текущая скорости деформируемой частицы; U – работа пластической деформации:

$$U = \int_0^H \sigma S \frac{d\delta_l}{dz} dz, \quad (13)$$

S – площадь поперечного сечения частицы.

Формулы (4) и (11) представим в виде

$$\frac{d_f}{D} = \alpha \frac{E_{d0}}{\sigma}, \quad \frac{E_d}{E_{d0}} = \sqrt{\frac{\sigma}{E_{d0}\alpha}}, \quad \alpha = \frac{KGb}{DE_{d0}}. \quad (14)$$

При определении работ фрагментации и деформации нужно учитывать, что в некоторой области, прилежащей к свободному торцу частицы, фрагментация не происходит вследствие малости напряжения сжатия. Ее границу z_f находим из условия $E_d = E_{d0}$ или $d_f = D$ в соответствии с (11). Тогда из (2) и (14) получаем

$$\zeta_f = \frac{z_f}{H} = \frac{\sigma_f}{\sigma_c} = \alpha \frac{E_{d0}}{\sigma_c}, \quad (15)$$

где σ_f – величина напряжения на искомой границе.

Применив (15) к моменту окончания удара, при котором $u = 0$, $\sigma_c = \sigma_{cm}$, найдем, что существует некоторая минимальная скорость удара, ниже которой фрагментация отсутствует во всем объеме частицы ($z_f = H$, $\zeta_f = 1$). Она соответствует отношению

$$\frac{\sigma_m}{E_{d0}} = \alpha. \quad (16)$$

Поскольку в этом случае энергия удара затрачивается только на деформацию, для определения минимальной скорости удара можно воспользоваться результатами работы [6]. Максимальное напряжение на контакте (в момент остановки частицы) выражается в виде

$$\sigma_{cm} = \sqrt{\frac{3}{2} E_{d0} \rho} u_0 = E_{d0} \frac{u_0}{c_{d0}}, \quad (17)$$

где $c_{d0} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{E_{d0}}{\rho}}$ – скорость распространения волны пластичности по аналогии со звуковой волной, определяемой через модуль упругости.

Таким образом,

$$u_{0\min} = \alpha c_{d0}. \quad (18)$$

Например, для частиц алюминия со средним диаметром зерна $D = 10 \mu\text{m}$, принимая $K = 20$, получим $u_{0\min} \approx 18 \text{ m/s}$. С ростом размера зерна $u_{0\min}$ уменьшается.

Учитывая существование зоны отсутствия фрагментации и принимая во внимание (15), работу пластической деформации можно выразить в виде

$$U = \frac{V\sigma_c^2}{E_{d0}} \left[\frac{1}{3}\zeta_f^3 + \frac{2}{5}\zeta_f^{1/2} (1 - \zeta_f^{5/2}) \right]. \quad (19)$$

Аналогично определяются энергозатраты на фрагментацию:

$$A_f = \frac{3VE_{d0}}{2K} (1 - \zeta_f)^2. \quad (20)$$

При $\zeta_f = 1$ выражение для U совпадает с полученным в [6], а $A_f = 0$.

Полагая $u = \frac{d\delta}{dt}$ (где $\delta = H_0 - H$ – изменение высоты частицы) и подставляя выражения (19) и (20) в (12), получаем уравнение для определения динамики деформации. Это уравнение не имеет аналитического решения, и зависимость $\delta(t)$ или $\sigma_c(t)$ может быть найдена только численно. Поэтому для получения легко обозримых результатов обратимся к конечному моменту удара, когда скорость частицы u становится равной нулю. Тогда получим алгебраические уравнения для определения зависимости таких характеристик, как максимальное (индекс m) напряжение на контакте σ_{cm} , максимальная деформация ε_m и минимальный размер фрагментов d_{fm} , от скорости удара u_0 и свойств материала. Так, для определения параметра ζ_{fm} будем иметь

$$\frac{\alpha^2}{5} \frac{6\zeta_{fm}^{1/2} - \zeta_{fm}^3}{\zeta_{fm}^2} + \frac{9\alpha}{2K} \frac{(1 - \zeta_{fm})^2}{\zeta_{fm}} = P^2, \quad (21)$$

где $P = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{\rho}{E_{d0}}} u_0 = \frac{u_0}{c_{d0}}$ – аналог числа Маха в газовой динамике.

Максимальная деформация всей частицы $\varepsilon_m = \frac{\delta_m}{H_0} = 1 - \frac{H_m}{H_0}$ определяется путем интегрирования уравнения (1) в зонах отсутствия и наличия фрагментации с использованием формулы (15) и учетом того, что $H = H_0 - \delta$:

$$\frac{\varepsilon_m}{1 - \varepsilon_m} = \frac{\alpha(4\zeta_{fm}^{1/2} - \zeta_{fm}^2)}{6\zeta_{fm}}. \quad (22)$$

Минимальный относительный размер субзерен, который реализуется на контактной площадке, рассчитывается с помощью формул (14) и (15):

$$\frac{d_{fm}}{D} = \zeta_{fm}. \quad (23)$$

Интересно, что он совпадает с относительным размером зоны отсутствия фрагментации.

Максимальная величина модуля упрочнения достигается на контактной площадке и в момент прекращения удара будет равна

$$\frac{E_{dm}}{E_{d0}} = \frac{1}{\sqrt{\zeta_{fm}}}. \quad (24)$$

Средний по высоте частицы размер субзерна определится как

$$\left(\frac{d_f}{D}\right)_{av} = \frac{1}{H} \int_0^H \frac{d_f}{D} dz = \zeta_f \left(1 + \ln \frac{1}{\zeta_f}\right). \quad (25)$$

Здесь использованы соотношения (2), (14) и (15).

Аналогичным образом получаем формулу для расчета среднего значения модуля упрочнения

$$\left(\frac{E_d}{E_{d0}}\right)_{av} = \frac{1}{H} \int_0^H \frac{E_d}{E_{d0}} dz = \frac{2 + \zeta_f^{3/2}}{3\zeta_f^{1/2}}. \quad (26)$$

Для материалов, подчиняющихся модели линейно-упрочняемого тела, при больших напряжениях сжатия возникает проблема трактовки процесса деформации, когда напряжение приближается к величине модуля линейного упрочнения, а локальная деформация – к 1. При наличии фрагментации величина модуля упрочнения не постоянна в объеме в соответствии с приложенным напряжением (формула (11)), поэтому впервые этот эффект проявится на контактной площадке в момент прекращения движения частицы ($u = 0$) при определенной «критической» скорости удара, которая находится подстановкой условия

$$\frac{\sigma_{cm}}{E_{dm}} = \frac{\sigma_{cm}}{E_{d0}} \frac{E_{d0}}{E_{dm}} = \frac{\alpha}{\sqrt{\zeta_{sm}}} = 1 \quad (27)$$

в уравнение (21). При получении условия (27) учитывалось, что $\frac{\sigma_{cm}}{E_{d0}} = \frac{\alpha}{\zeta_{fm}}$ и

$$\frac{E_{dm}}{E_{d0}} = \frac{1}{\sqrt{\zeta_{fm}}}.$$

Для вышеприведенного примера с алюминиевыми частицами ($K = 20$) будем иметь $u_{0cr} \approx 1380$ m/s при $\alpha = 0.062$, $\zeta_{sm} = 0.0038$. В этих условиях минимальный размер субзерен составит около 40 nm, а максимальное упрочнение достигнет 16 раз.

Предполагается [6], что при скорости удара, превышающей u_{0cr} , материал приобретает свойства жидкости (сверхтекучесть) там, где напряжение должно быть больше модуля упрочнения, а на границе зоны сверхтекучести напряжение в твердом материале остается постоянным и равным модулю упрочнения. Остается неясным, каковы будут размеры зерен или субзерен при рекристаллизации после сброса нагрузки. Во всяком случае, они не контролируются. Поэтому будем считать скорость u_{0cr} предельной для процесса фрагментации.

Диапазон скоростей удара, в котором возможна фрагментация зерен по рассмотренному механизму, лежит между $u_{0\min}$ и $u_{0\text{cr}}$. Если свойства материала и параметры частицы таковы, что $u_{0\min} > u_{0\text{cr}}$, то, очевидно, фрагментация при ударе вообще не происходит. Приравняв эти скорости, найдем минимальный исходный размер зерен, ниже которого фрагментация не имеет места. Это условие в соответствии с (18) отвечает равенству $P_{\min} = P_{\text{cr}} = \alpha = \alpha_{\max}$, подставляя которое в (21), получим уравнение для определения параметра α_{\max} :

$$\alpha_{\max}^2 = \frac{6 - \alpha_{\max}^5}{5\alpha_{\max}} + \frac{9(1 - \alpha_{\max}^2)}{2K\alpha_{\max}},$$

решение которого, как нетрудно видеть, $\alpha_{\max} = 1$. Таким образом, минимальный в указанном смысле размер зерна находится из соотношения

$$D_{\min} = \frac{KGb}{E_{d0}}.$$

На рис. 2 показаны расчетные зависимости относительного среднего по объему модуля линейного упрочнения $E_{d\text{av}}/E_{d0}$ и относительного среднего размера фрагментов $d_{f\text{av}}/D$ алюминиевой частицы от скорости удара и величины коэффициента K . Исходный размер зерна $D = 10 \mu\text{m}$. Как видно, для увеличения среднего значения модуля упрочнения, например, в 2 раза необходима скорость соударения частицы с мишенью от 130 до 500 m/s в диапазоне K от 20 до 100. При этом средний размер фрагментов становится примерно в 2.5 раза меньше исходного размера зерна независимо от величины K (в соответствии с формулами (25) и (26)).

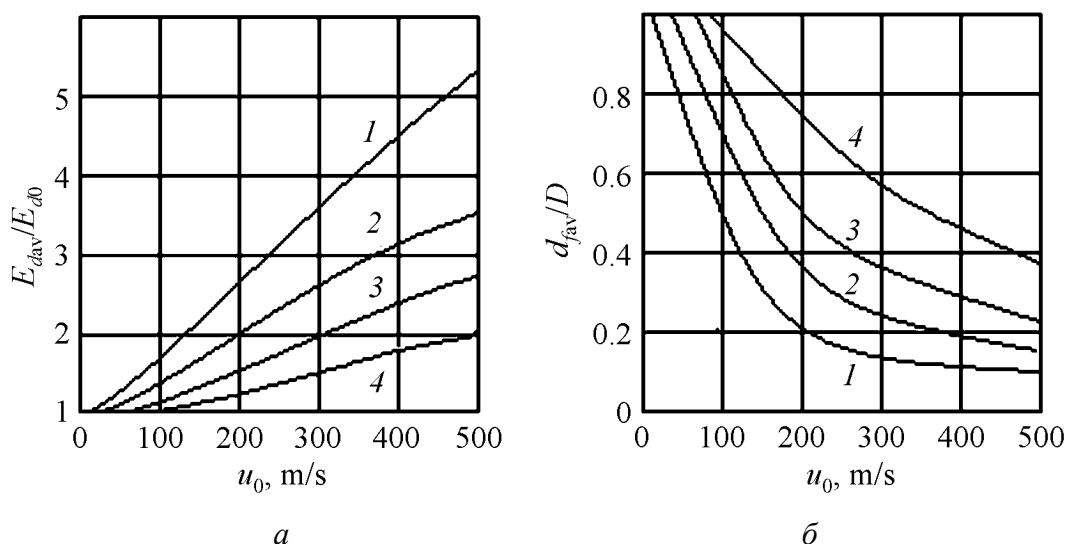


Рис. 2. Влияние скорости удара и коэффициента K на изменение средних по объему модуля упрочнения (а) и размера фрагментов зерен (б) в алюминиевой частице при $D = 10 \mu\text{m}$: 1 – $K = 20$, 2 – 40, 3 – 60, 4 – 100

Коэффициент K в формуле Пуарье (4) существенно зависит от вида материала, способа его получения и обработки и может изменяться от нескольких десятков до нескольких сотен даже для одного и того же материала [7]. Поэтому приведенный метод оценки влияния фрагментации зерен металлов под действием больших сжимающих напряжений на их свойства может преследовать лишь методологическую цель, а не получение количественных результатов.

Заключение

Предложена модель образования фрагментов зерен металлической частицы при высокоскоростном соударении ее с твердой мишенью. Получены выражения для определения удельной энергии, затрачиваемой на фрагментацию зерен и диссипацию механической энергии деформации.

Метод расчета фрагментации, деформации и упрочнения металлической частицы при ударе о мишень основан на уравнении сохранения энергии. Показано, что существует минимальная скорость удара, ниже которой фрагментация отсутствует во всем объеме частицы.

Получены алгебраические уравнения для определения зависимости таких характеристик, как максимальное напряжение на контакте, максимальная деформация, минимальный и средний размеры фрагментов, максимальная и средняя величины модуля линейного упрочнения, от скорости удара и свойств материала.

Расчеты показали существенное влияние коэффициента K в формуле Пуарье на изменение модуля упрочнения в зависимости от скорости удара.

1. *А.П. Алхимов, В.Ф. Косарев, А.Н. Папырин*, ПМТФ **39**, 182 (1998).
2. *T.H. Van Steenkiste, J.R. Smith, R.E Teed*, Surface and Coatings Technology **154**, 237 (2002).
3. *А.П. Алхимов, В.Ф. Косарев, А.В. Плохов*, Научные основы технологии холодного газодинамического напыления (ХГН) и свойства напыленных материалов, НГТУ, Новосибирск (2006).
4. *Л.И. Тушинский, А.П. Алхимов, С.В. Клинов, В.Ф. Косарев, А.В. Плохов, Н.С. Мочалина, Е.С. Сидякина*, Технология металлов № 3, 19 (2008).
5. *Н.А. Кильчевский*, Теория соударения твердых тел, Наукова думка, Киев (1969).
6. *Б.А. Урюков, Г.В. Ткаченко*, Порошковая металлургия № 3/4, 57 (2009).
7. *Ж.П. Пуарье*, Высокотемпературная пластичность кристаллических тел, Металлургия, Москва (1982).
8. *Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц*, Теоретическая физика, Т. VII. Теория упругости, Наука, Москва (1987).
9. *Г. Шлихтинг*, Теория пограничного слоя, Наука, Москва (1969).

B.A. Uryukov, G.V. Tkachenko

A METHOD FOR CALCULATION OF HARDENING OF METAL PARTICLES AT HIGH VELOCITY IMPACT WITH A TARGET

At high-speed collision of metallic particles with a solid surface, breaking (fragmentation) of grains occurs up to the formation of nanoscale structures, which results in increased strength of the material. In this paper, physical and mathematical model of the deformation, formation of fragments and dissipation of impact energy is considered. It is assumed that the material conforms to the model of linear hardening of the ductile body, and at high compressive stresses characteristic to high-speed impact, the stress dependence of local plastic deformation is similar to Hooke's law. A method of calculation of fragmentation, deformation and strengthening of metal particles at impact with a target is developed on the basis of the energy conservation equation $\frac{mu^2}{2} + U + A_f = \frac{mu_0^2}{2}$. Here m , u_0 , u are mass, impact velocity, current velocity; U , A_f are energies of plastic deformation and fragmentation of particle. The expressions for calculation of these components were obtained. An estimation of dissipative energy demonstrated that it is small in the impact range characteristic to technological processes of hardening. It is shown that there is a minimal impact velocity below which the fragmentation is absent throughout the whole particle volume. Algebraic equations for determination of such characteristics as maximal stress on contact, maximal deformation, minimum and average size of fragments and maximum and average modulus of linear hardening in dependence on impact velocity and material properties were derived. Calculation examples are given. Empirical coefficient used for calculation of subgrain size may significantly vary depending on the type of material, the method of production and processing. Therefore this work pursues a methodological purpose, and not to obtain quantitative results.

Keywords: three-dimensional nanomaterials, high-impact, plastic deformation, fragmentation of grains of metallic materials, modulus of linear hardening, dissipation of mechanical work

Fig. 1. Model of grain fragmentation under deforming strain

Fig. 2. Effect of impact velocity and the coefficient K on the volume average of hardening modulus (a) and the size of grain fragments ($\bar{\sigma}$) in aluminum particle with $D = 10 \mu\text{m}$: 1 – $K = 20$, 2 – 40, 3 – 60, 4 – 100