

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАПЫЛЕНИЯ МИКРОЧАСТИЦ, РАСПРЕДЕЛЕННЫХ В РАЗОГРЕТОМ ГАЗОВОМ ПОТОКЕ

Бураго Н. Г.¹, Никитин А. Д.², Никитин И. С.²,
Стратула Б. А.^{2,3}

¹Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлунского РАН, Москва

²Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

³Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)

В работе численно-аналитически исследуется процесс напыления на подложку металлических микрочастиц в горячем газовом потоке при температуре, близкой к температуре плавления.

Введение. При напылении наращиваемой части изделия, толщина слоев и их механические свойства определяются конечной толщиной сплющивания горячих частиц в процессе удара. Для расчета данного процесса применена классическая одномерная модель Тейлора для задачи соударения жесткопластического цилиндрического стержня с недеформируемой преградой [1]. Для закона упрочнения, близкого к линейному, методом возмущений получены приближенные аналитические оценки для толщины «сплюсненной» частицы, ее радиуса и времени соударения в зависимости от скорости подлета частицы. Работоспособность полученных формул показана путем сравнения с результатами многомерного моделирования процесса соударения по конечно-элементным схемам.

1. Схема Тейлора. Рассмотрим схему динамического деформирования, которая в целом соответствует классической модели Тейлора и приведена в работах [1–3]. Цилиндр длины h_0 , радиусом r_0 из несжимаемого жесткопластического материала движется поступательно, скорость v_0 совпадает с его продольной осью. В момент времени $t = 0$ он ударяется в жесткую преграду, нормальную к скорости движения стержня (Рис. 1). Будем рассматривать движение стержня в квазиодномерном приближении, распределение скоростей и напряжений по сечению стержня считаем однородным.

Система уравнений включает соотношение для деформации за фронтом пластической волны, закон сохранения импульса на фронте пластической волны, кинематическое соотношение для высоты жесткой части цилиндра, закон Ньютона для жесткой (недеформируемой) части цилиндра и уравнение пластического деформирования:

$$\varepsilon = v/(v + w), \quad \rho(v + w)v = \sigma - \sigma_s, \quad dh/dt = -(v + w)$$
$$\rho h dv/dt = -\sigma_s, \quad \sigma = \sigma_s + E_p \varepsilon^m$$

Здесь $v(t)$ — скорость жесткой части цилиндра, $w(t)$ — скорость пластической волны, $\sigma(t)$ — напряжение за пластическим фронтом, σ_s — предел текучести, ρ —

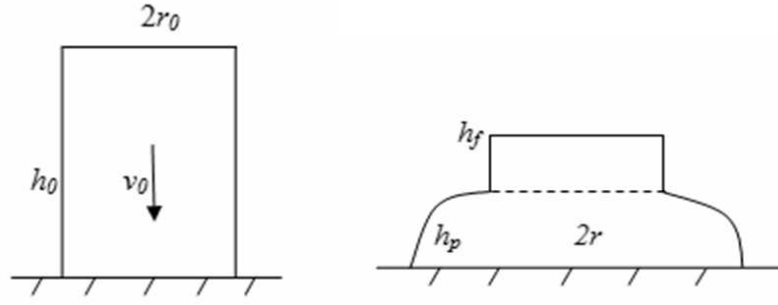


Рисунок 1 – Модель Тейлора

плотность, E_p – модуль упругости, m – степенной показатель упругости. Начальные условия имеют вид:

$$t = 0 : v = v_0, \quad h = h_0$$

Момент остановки цилиндра $t = t_f$, и высота жесткой части h_f определяются условиями

$$v = 0, \quad w = 0$$

Систему уравнений принятой модели можно привести к следующему виду:

$$dh/dt = -(v + w), \quad dv/dt = -\sigma_s/(\rho h), \quad w = (E_p/\rho)^{1/(m+1)} v^{(m-1)/(m+1)} - v$$

Для выполнения условия $w = 0$ при $t = t_f$ необходимо, чтобы $m > 1$.

Аналитически проинтегрировать систему и получить функцию $v(t)$ для произвольного $m > 1$ не удастся, поэтому было построено приближенное решение с главными членами, полученными при разложении по малому параметру $\gamma \ll 1$, $m = 1 + \gamma > 1$. Предполагалось, что диаграмма $\sigma - \varepsilon$ в пластической области близка к линейной ($E_p \ll E$, где E – модуль Юнга).

Результаты приближенного решения имеют вид:

$$h(v) = h_0 \exp((v - v_0)/v_*), \quad v(t) = v_0 + v_* \ln(1 - t/t_0), \quad w(t) = v_c((v/v_c)^{\gamma/2} - v/v_c)$$

$$h_f = h_0 \exp(-v_0/v_*), \quad t_f = t_0(1 - \exp(-v_0/v_*))$$

где

$$v_c = \sqrt{E_p/\rho}, \quad v_* = \sigma_s/\sqrt{\rho E_p}, \quad t_0 = h_0/v_c$$

Высота пластической зоны h_p определяется по скорости пластической волны $w(t)$:

$$\int_0^{t_f} w(t) dt = h_0 \left((v_0/v_c)^{\gamma/2} (1 - \exp(-v_0/v_*)) - (v_0/v_c) + (v_*/v_c) (1 - \exp(-v_0/v_*)) \right)$$

Суммарная высота (сплющенного) цилиндра после удара равна $h_1 = h_p + h_f$. Заметим, что в данном приближении явно не описывается форма пластической (сплющенной) части стержня, поэтому радиус пластической части определяется из условия несжимаемости.

Ниже приведено численное решение полученной выше системы уравнений для соударения титановой частицы с жесткой плоской преградой при следующих характеристиках: высота $h_0 = 30$ мкм, $r_0 = h_0/2$, плотность $\rho = 4500$ кг/м³, модуль Юнга $E = 116 \cdot 10^9$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0.32$, предел текучести при комнатной температуре $\sigma_{s0} = 3 \cdot 10^8$ Па, скорость частицы $v_0 = 20$ м/с. Температура рассматриваемой частицы лежит в диапазоне $T = 1600 - 1660$ °С. Температура плавления $T_m = 1665$ °С. Для значений предела текучести в окрестности температуры плавления существует большая неопределенность [4], поэтому примем линейную зависимость предела текучести от температуры: $\sigma_s = \max(\sigma_{s0}(T_m - T)/T_m, 0)$.

На Рис. 2-3 показаны формы деформированной частицы при различных температурах потока, относительно близких к температуре плавления, и соответствующих им пониженных значениях предела текучести. Представлены конечные графики функций $h(r)$.

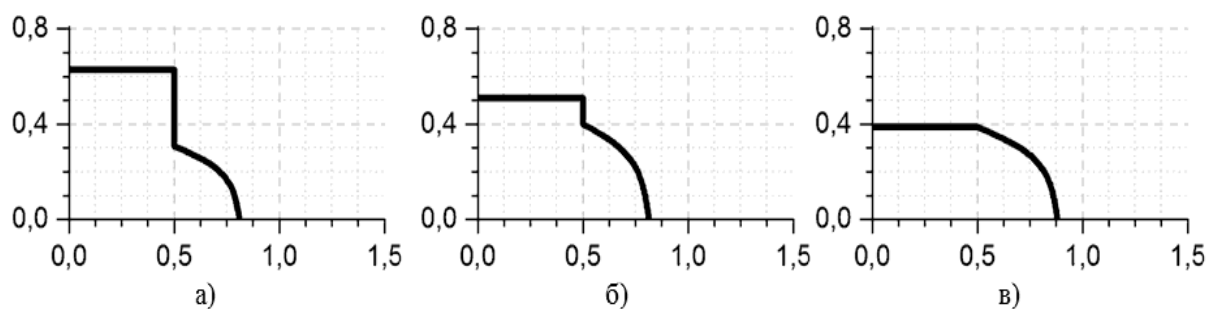


Рисунок 2 – Форма частицы при $v_0 = 20$ м/с, $E_p = 2.5 \cdot 10^7$ Па, $m = 1.2$; а) $T = 1600$ °С, б) $T = 1620$ °С, в) $T = 1633$ °С

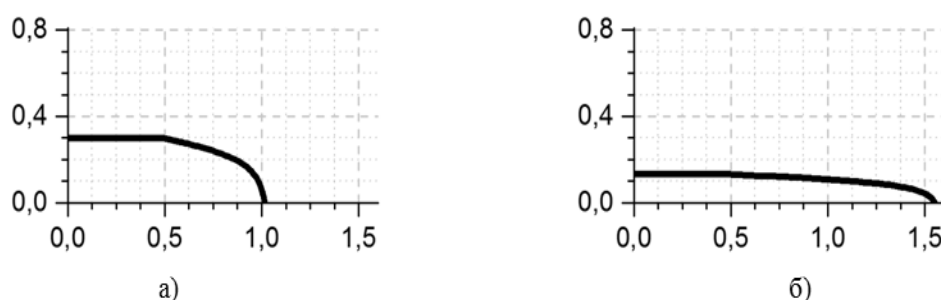


Рисунок 3 – Форма частицы при $v_0 = 20$ м/с, $E_p = 2.5 \cdot 10^7$ Па, $m = 1.2$; а) $T = 1640$ °С, б) $T = 1650$ °С

Формы деформированной частицы при различных скоростях потока показаны на Рис. 4. Влияние упрочнения E_p и показателя m на формы деформированной частицы представлено на Рис. 5.

2. Многомерное моделирование. Были проведены численные расчеты осесимметричной нестационарной задачи соударения упругопластической цилиндрической частицы, разогретой горячим газовым потоком, с жесткой преградой. Численный метод описан в [5]. Результаты, соответствующие решению на Рис. 2, показаны на Рис. 6-7.

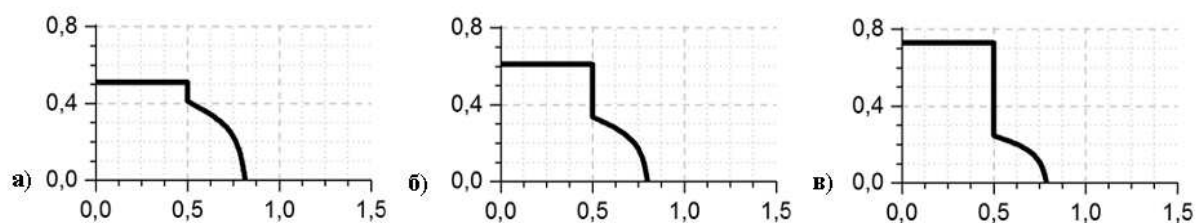


Рисунок 4 – Форма частицы при $T = 1620 \text{ }^\circ\text{C}$, $E_p = 2.5 \cdot 10^7 \text{ Па}$, $m = 1.2$; а) $v_0 = 20 \text{ м/с}$, б) $v_0 = 15 \text{ м/с}$, в) $v_0 = 10 \text{ м/с}$

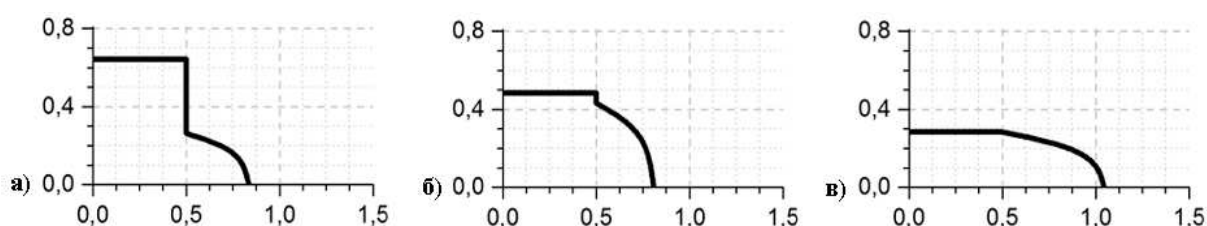


Рисунок 5 – Форма частицы при $v_0 = 20 \text{ м/с}$, $T = 1620 \text{ }^\circ\text{C}$; а) $E_p = 2.5 \cdot 10^7 \text{ Па}$, $m = 1.8$, б) $E_p = 1.0 \cdot 10^7 \text{ Па}$, $m = 1.8$, в) $E_p = 1.0 \cdot 10^7 \text{ Па}$, $m = 1.2$

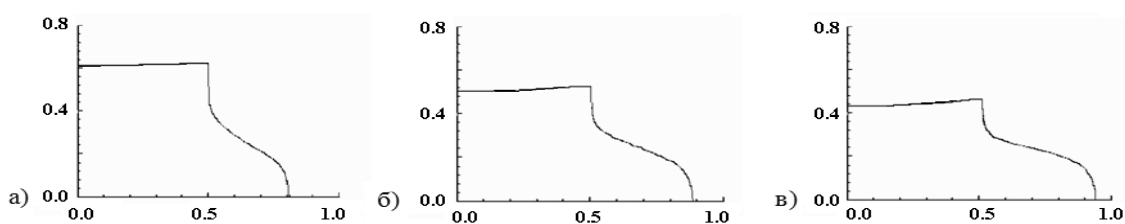


Рисунок 6 – Форма частицы при $v_0 = 20 \text{ м/с}$, а) $T = 1600 \text{ }^\circ\text{C}$, б) $T = 1620 \text{ }^\circ\text{C}$, в) $T = 1633 \text{ }^\circ\text{C}$

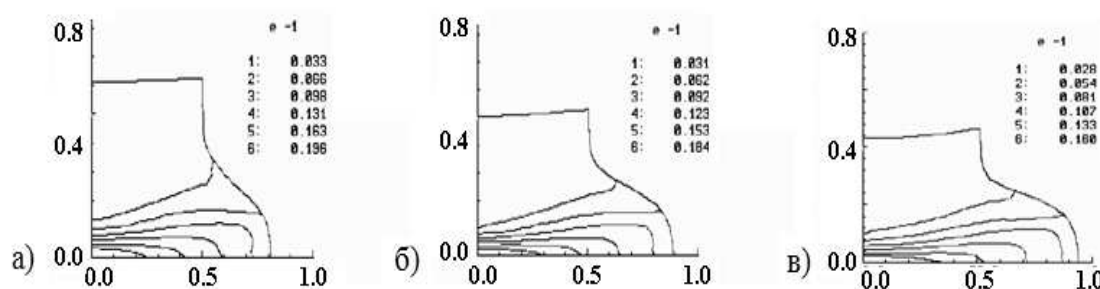


Рисунок 7 – Изолинии пластической работы при $v_0 = 20 \text{ м/с}$, а) $T = 1600 \text{ }^\circ\text{C}$, б) $T = 1620 \text{ }^\circ\text{C}$, в) $T = 1633 \text{ }^\circ\text{C}$

Сравнение Рис. 2 и Рис. 6 показывает, что приближенная одномерная (стержневая) схема расчета неплохо улавливает конечную толщину деформированной частицы в рассматриваемом диапазоне параметров, хотя продольный и поперечный размер частицы в данном случае совпадают, и возможность применения подобной схемы не является очевидной.

Выводы. Для закона упрочнения, близкого к линейному, методом возмущений получены приближенные аналитические оценки для конечной толщины деформированной горячей частицы, падающей на недеформируемую подложку, ее радиуса и времени соударения в зависимости от скорости подлета. Численно-аналитически решена система обыкновенных дифференциальных уравнений рассматриваемой приближенной модели. Проведено сравнение численно-аналитических результатов в одномерном приближении с результатами многомерного моделирования нестационарного процесса соударения по конечно-элементным схемам. Показана работоспособность полученных формул для оценки толщин нарастающих слоев в зависимости от скорости частиц и температуры потока.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Зукас Дж. А., Николас Т. Свифт Х. Ф. и др.* Динамика удара. М.: Мир. 1985. 296 с
- [2] *Гольдсмит В.* Удар. М.: Изд-во литературы по строительству. 1965. 448 с..
- [3] *Барвинок В. А., Богданович В. И.* Физическое и математическое моделирование процесса формирования мезоструктурно-упорядоченных плазменных покрытий // Журнал технической физики. 2012. Т. 82. Вып. 2. С. 105–112.
- [4] *Микляев П. Г.* Механические свойства легких сплавов при температурах и скоростях обработки давлением. М.: Металлургия. 1994. 279 с.
- [5] *Бураго Н. Г., Никитин И. С., Якушев В. Л.* Гибридный численный метод решения нестационарных задач механики сплошной среды с применением адаптивных наложенных сеток // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2016. Т. 56. № 6. С. 1082–1092.

Burago N. G., Nikitin A. D., Nikitin I. S., Stratula B. A. *Simulation of the process of deposition of microparticles distributed in a heated gas stream.* Approximate analytical estimates for the finite thickness of a deformed hot particle incident on an undeformed substrate, its radius and the collision time as a function of the speed are obtained for the law of hardening close to linear, by the perturbation method. The system of ordinary differential equations of the approximate model under consideration is numerically and analytically solved. A comparison of the numerical and analytical results in the one-dimensional approximation with the results of multivariate modeling of the unsteady collision process using finite-element schemes is carried out. The efficiency of the obtained formulas for estimating the thicknesses of the build-up layers as a function of particle velocity and flow temperature is shown..