

PACS numbers: 45.50.Jf, 47.27.nf, 47.40.Ki, 47.60.Kz, 47.61.Jd, 47.85.mb, 81.65.-b

Кинематика твёрдой частицы, разгоняемой потоком газа в сверхзвуковом сопле, и деформационное упрочнение обработанной поверхности

А. И. Долматов, С. В. Сергеев, М. А. Курин, В. В. Воронько,
Т. В. Лоза

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»,
ул. Чкалова, 17,
61070 Харьков, Украина*

Работа посвящена решению актуальной задачи определения скорости твёрдой частицы в сопле Лавала и за его пределами аналитическими методами. Одним из важнейших критериев эффективности, характеризующим любой технологический процесс, в основе которого лежит контакт высокоскоростной частицы с подложкой, является кинетическая энергия частицы, а также её важнейшая составляющая — скорость. С целью получения удобной аналитической зависимости для расчёта скорости частицы по каналу сопла введён параметр, который описывает ускорение газового потока в сопле. Установлена зависимость скорости частицы в канале сопла Лавала от параметров газового потока и частицы (плотность и диаметр). На основании теоретических исследований кинематики частицы, разгоняемой потоком газа в сопле, получены выражения, которые дают возможность выполнить расчёт скорости и энергий частицы при столкновении с подложкой. Представлены зависимости энергий частицы на выходе из сопла от скорости истечения газа и диаметра частицы. Рассмотрено влияние параметров обработки на характеристики деформационного упрочнения материала поверхности.

Роботу присвячено вирішенню актуальної задачі визначення швидкості твердої частинки у Лавалевому соплі та за його межами аналітичними методами. Одним з найважливіших критеріїв ефективності, що характеризує будь-який технологічний процес, в основі якого лежить контакт високошвидкісної частинки з підложкою, є кінетична енергія частинки, а також її найважливіша складова — швидкість. З метою одержання зручної аналітичної залежності для розрахунку швидкості частинки по каналу сопла введено параметр, який описує прискорення газового потоку в соплі. Встановлено залежність швидкості частинки в каналі Лавалєвого

сопла від параметрів газового потоку і частинки (густина і діаметер). На підставі теоретичних досліджень кінематики частинки, що розганяється потоком газу в соплі, одержано вирази, які уможливають виконати розрахунок швидкості й енергій частинки при зіткненні з підложжям. Представлено залежності енергій частинки на виході з сопла від швидкості витікання газу і діаметра частинки. Розглянуто вплив параметрів оброблення на характеристики деформаційного зміцнення матеріалу поверхні.

This investigation is concerned with an actual problem of determining the velocity of the solid particles inside and outside convergent-divergent (Laval) nozzle by analytical methods. The kinetic energy of a particle and its most important component—velocity are the most important performance criteria, which characterise any process, based on the high-speed particle contact with the substrate. Parameter, which describes the acceleration of the gas flow in the nozzle outfall, is introduced to obtain analytical dependence for easy calculation of the speed of the particles in nozzle. The dependence of particle velocity in the channel of Laval nozzle on parameters of gas flow and particles (density and diameter) is defined. The equations are obtained, which make it possible to calculate the particle velocity and energy upon collision with the substrate on the basis of theoretical studies of kinematics of particles being accelerated in the nozzle gas flow. The dependences of particle energy at the nozzle outfall on speed of gas flow and particle diameter are presented. The influence of processing parameters on the work hardening performances of the material surface is discussed.

Ключевые слова: скорость абразивных частиц, деформационное упрочнение, двухфазный поток, канал сопла, струйно-абразивная обработка.

(Получено 17 декабря 2014 г.; окончат. вариант — 26 мая 2015 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надёжности и ресурса отдельных деталей и узлов современного авиационного двигателя является одной из важнейших задач авиадвигателестроения. Эксплуатационные свойства основных деталей во многом зависят от формирования однородного по своим физико-механическим свойствам и структуре поверхностного слоя. Обеспечить основные эксплуатационные свойства деталей ГТД, упрочнить и повысить износостойкость поверхности можно при помощи покрытий со специальными свойствами. Комбинированный технологический цикл, который включает в себя очистку, подготовку и активацию поверхности совместно с нанесением покрытий, является одним из перспективных направлений инженерии поверхности [1].

Струйно-абразивная обработка деталей, особенно обладающих сложной пространственной формой, в качестве метода очистки и

активации поверхности перед нанесением покрытия в последнее время представляет все больший интерес для исследователей и технологов в машиностроении, приборостроении, электротехнической промышленности, авиационной промышленности [2–5].

Анализ литературы [1–5] показал, что использование абразивного порошка в качестве обрабатывающего инструмента для деталей сложной формы обеспечивает экономичность процесса, особенно в том случае, когда абразивный порошок вводят в газовый поток за пределами канала сопла, таким образом, исключая его износ. Однако, при такой схеме обработки кинетическая энергия, сообщаемая абразивным зёрнам, существенно ниже по сравнению со схемой, когда порошок вводится в канал сопла. Это приводит к снижению эффективности процесса очистки и сдерживает применение метода в производстве. Этим обусловлена необходимость дальнейших теоретических и экспериментальных исследований закономерностей формирования газо-абразивной струи.

2. ФОРМУЛИРОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Поскольку при струйно-абразивной обработке используется свободный зернистый абразив, полностью исключаются прижоги, температурные и силовые деформации обрабатываемых деталей. Управляя скоростью и концентрацией абразивных частиц в несущей их воздушной струе можно упрочнить поверхностный слой, подготовить поверхности под покрытия, очистить её от окисной плёнки, окалины, коррозии, лакокрасочных покрытий, удалить заусенцы, скруглить острые кромки.

Газо-абразивная струя, относится к гетерогенной динамической среде, основной особенностью которой является совместное движение газового потока и распределённых в нем абразивных частиц. При этом газовая фаза является несущей средой, её движение определяет движение абразивных зёрен. Технологические характеристики газо-абразивной струи зависят от концентрации абразивных частиц, их режущей способности и от кинетической энергии удара абразивных частиц об обрабатываемую поверхность.

Деформационное упрочнение поверхности, которое достигается за счёт кинетической энергии потока частиц, приводит к повышению усталостной прочности, износостойкости, контактной выносливости и коррозионной стойкости. Глубина и степень наклёпа определяются взаимодействием абразивной частицы с обрабатываемой поверхностью и зависят от режима струйно-абразивной обработки, а также физико-механических свойств материала обрабатываемой детали.

Целью данного исследования является:

— определение кинетической энергии, сообщённой абразивным

зёрнам в процессе струйно-абразивной обработки. Так как масса абразивных зёрен является постоянной величиной, задача определения энергии сводится к определению скорости абразивных частиц;

— установление оптимальных показателей качества поверхности обрабатываемых деталей, путём определения функциональных зависимостей глубины упрочнённого слоя и степени наклёпа от технологических параметров струйно-абразивной обработки.

3. РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

3.1. Определение кинетической энергии абразивной частицы

При записи исходного уравнения движения считаем, что инжектируемая частица в потоке газа-носителя ускоряется под действием силы аэродинамического сопротивления без учёта других составляющих (Магнуса, Саффмена, Басе, Архимеда и пр.) в силу их незначительного влияния на течение газозвеси [6]. Поток газа в канале ствола считаем одномерным и изоэнтропическим. Известно, что скорость носителя в сопле Лавалья является функцией сечения. Это используется в большинстве моделей при определении закона изменения скорости потока в канале сопла. В случае движения частицы в потоке газа левая часть уравнения, как правило, содержит первую производную скорости частицы по времени. В связи с этим возникает необходимость в аналогичном представлении скорости потока газа с целью получения удобной аналитической зависимости для оценки скорости частиц на срезе сопла.

На основании выше представленных рассуждений, уравнение движения частицы материала массой m можно записать следующим образом:

$$m \frac{\partial V_i}{\partial t} = C_0 \rho_i \frac{S}{2} (U_i + at - V_i)^2, \quad (1)$$

где m — масса частицы, S — площадь миделя частицы, C_0 — коэффициент лобового сопротивления, ρ_i — плотность потока рабочей среды в i -ом сечении, U_i — скорость потока рабочей среды в i -ом сечении, V_i — скорость частицы в i -ом сечении, a — ускорение потока между соответствующими сечениями сопла.

Преобразуем уравнение (1) к виду:

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} = \xi_i (U_i + at - V_i)^2, \quad (2)$$

где $\xi_i = 3C_0 \rho_i / (4\rho_c d)$, ρ_c — плотность частицы, d — диаметр частицы.

Рассмотрим комплекс ξ_i , который является функцией плотности

потока, а, следовательно, и координаты (времени). Сравнение градиентов изменения скорости и плотности газа по каналу сопла показывает, что скорость изменения плотности меньше скорости изменения потока на три порядка. Это даёт возможность без значительного ущерба для точности расчётов, принять допущение, что ξ_i является функцией только плотности потока, но не времени.

Коэффициент лобового сопротивления в общем случае представляет собой функцию от числа Рейнольдса $C_0 = f(R_e)$ и зависит от скоростного режима движения частиц. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от чисел Рейнольдса достаточно сложна и различна для тел разной формы [7], но для $R_e \cong 100000-200000$ коэффициент лобового сопротивления остаётся постоянным и для шара его значение $C_0 = 0,5$. Принятые допущения позволяют значительно упростить математическую модель, что существенно для прикладных расчётов.

После преобразований уравнение (2) можно свести к следующему:

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} = \xi_i V_i^2 - 2\xi_i (U_i + at)V_i + \xi_i (U_i^2 + 2U_i at + a^2 t^2). \quad (3)$$

Дифференциальные уравнения первого порядка такого вида является уравнением Риккати и в общем случае не интегрируется в квадратурах. Уравнение (3) можно записать в виде:

$$y' + P^p y^2 + Q^q y + R^r = 0,$$

где $P = P(x)$, $Q = Q(x)$, $R = R(x)$ — полиномы степеней p , q и r соответственно.

Для решения искомого уравнения воспользуемся методикой, изложенной в работах [8–10]. В предположении, что частное решение уравнения так же является полиномом, возникает задача в определении его порядка.

Тогда для нашего случая получаем следующее:

$$P^p = -\xi_i, \quad Q^q = 2\xi_i (U_i + at), \quad R^r = -\xi_i (U_i^2 + 2U_i at + a^2 t^2),$$

где $p = 0$, $q = 1$, $r = 2$.

Так как $r > q > p$, для $r \geq 2q - p$ вычислим $r = 2 \cdot 1 - 0 = 2$. Следовательно, нужно воспользоваться формулой $k = 2 - q = 2 - 1 = 1$. Частное решение необходимо искать в виде $V_1 = At + B$. Подставим $At + B$ в уравнение (3) и выполним действие:

$$(At + B)' = \xi_i (At + B)^2 - 2\xi_i (U_i + at)(At + B) + \xi_i (U_i^2 + 2U_i at + a^2 t^2),$$

$$A = \xi_i (A^2 t^2 + 2ABt + B^2) - 2\xi_i (AU_i t + Aat^2 + BU_i + Bat) +$$

$$+ \xi_i U_i^2 + 2U_i a t \xi_i + a^2 t^2 \xi_i.$$

После последовательности действий, указанных в работах [9, 10], а также с учётом изменения плотности потока по каналу ствола общие решения уравнения (3) можно записать в виде двух систем:

$$\left. \begin{aligned} \xi_i &= \frac{3C_0 \rho_i}{4\rho_{\text{ч}} d}, \\ C_1 &= \frac{V_0 \xi_0^2 + \xi_0 \sqrt{a \xi_0} - U_0 \xi_0^2}{V_0 \xi_0 - \sqrt{a \xi_0} - U_0 \xi_0}, \\ V_{1i} &= a(t_i - t_0) + \frac{\sqrt{a \xi_i} + U_0 \xi_i}{\xi_i} + \frac{2\sqrt{a \xi_i}}{C_1 e^{-2\sqrt{a \xi_i}(t_i - t_0)} - \xi_i}; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \xi_i &= \frac{3C_0 \rho_i}{4\rho_{\text{ч}} d}, \\ C_2 &= \frac{U_0 \xi_0^2 + \xi_0 \sqrt{a \xi_0} - V_0 \xi_0^2}{V_0 \xi_0 + \sqrt{a \xi_0} - U_0 \xi_0}, \\ V_{2i} &= a(t_i - t_0) - \frac{\sqrt{a \xi_i} - U_0 \xi_i}{\xi_i} + \frac{2\sqrt{a \xi_i}}{C_2 e^{2\sqrt{a \xi_i}(t_i - t_0)} + \xi_i}; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

здесь U_0, V_0, ξ_0 — значения скорости потока, скорости частицы и функции плотности потока в момент времени t_0 .

Полученные решения требуют пояснения.

Несмотря на то, что решение (6) не имеет сингулярности в нуле и идентично решению (5) при $t \gg 0$, на наш взгляд, в окрестности точки $t = 0$ наиболее точно физику процесса описывает решение (5). Следует также понимать, что при определении скорости частицы в интересующем сечении, в качестве аргумента используется время, которое характеризует скорость потока рабочего тела в сечении, а не пройденную частицей дистанцию. Таким образом, в правой части выражений (5) и (6) стоят параметры, которые описывают изменение состояния газа, а не частицы.

Задача поиска ускорения потока носителя усложняется тем, что скорость потока в сопле является функцией состояния газа, а не времени. С удовлетворительной точностью изменение скорости потока газа по сечению можно аппроксимировать тремя отрезками, для каждого из которых необходимо определить величину ускорения потока: дозвуковой участок, участок критического сечения и сверхзвуковой участок.

Для определения величины ускорения потока в сечении восполь-

зуюемся следующими рассуждениями.

Рассмотрим сопло, выделим два произвольных сечения на одном из трёх участков. Скорость потока в этих сечениях можно определить по известной формуле [11]:

$$U_i = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_0^* \left(1 - \beta_i^{\frac{k-1}{k}}\right)},$$

где k — показатель адиабаты, $k = 1,4$, R — газовая постоянная воздуха, $R = 287$ Дж/(кг·К), T_0^* — температура воздуха на входе в сопло, $\beta_i = P_i/P_0^*$ — перепад давлений.

Так как рабочая среда по каналу сопла ускоряется, будем считать поток равноускоренным, тогда ускорение между двумя произвольными сечениями можно найти по формуле:

$$a_i = \frac{U_{i+1}^2 - U_i^2}{2L_{i+1,i}}, \quad (7)$$

где U_i^2, U_{i+1}^2 — скорости потока в сечениях i и $i+1$, $L_{i+1,i}$ — расстояние между соответствующими сечениями.

Определение ускорения потока на каждом из трёх участков по зависимости (7) позволяет, в конечном итоге, определить скорость частицы на выходе из сопла, что является ключевым для определения скорости и кинетической энергии частицы при столкновении с подложкой.

При движении частицы в газообразной среде после выхода из сопла, на неё будет действовать сила сопротивления, величина которой будет пропорциональна плотности, площади миделя и квадрату скорости [12]. Такое движение характеризуется тем, что кинетическая энергия частицы расходуется не только на трение между слоями среды, а и на перемещение объёма среды перед частицей. В этом случае второй закон Ньютона для частицы можно записать в следующем виде:

$$m \frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{C_0 \rho V^2}{2} S. \quad (8)$$

Уравнение (7) имеет следующее решение:

$$V = \frac{V_c}{1 + V_c \xi_c t}, \quad (9)$$

где $\xi_c = 3C_0 \rho_c / (4\rho_c d)$ — комплекс, введённый нами по аналогии с уравнением (1) и учитывающий плотность среды, в которой движется частица, V_c — скорость частицы на выходе из сопла.

Интегрированием выражения (8) можно легко найти закон дви-

жения частицы:

$$S(t) = \xi_c^{-1} \ln(1 + V\xi_c t). \quad (10)$$

Для оценки адекватности модельных представлений произведём расчёт скорости частицы в канале сопла Лавалья со следующими исходными данными: давление и температура на входе в сопло $P_0^* = 1$ МПа, $T_0^* = 1000$ К, давление воздуха на выходе из сопла $P_{\text{вых}} = 0,04$ МПа, расход воздуха через сопло $G = 9$ кг/с, углы раскрытия сопла $\alpha_1 = 12^\circ$, $\alpha_2 = 46^\circ$.

На рисунке 1 представлены графики изменения скорости потока и частицы алюминия диаметром 30 мкм. Здесь и далее мы рассматриваем разгон и взаимодействие с подложкой частиц алюминия не из технологической целесообразности, а лишь для проверки правильности наших модельных представлений и сравнения результатов расчёта с экспериментальными данными установки JP-5000.

По проточной части сопла скорости потока и частицы возрастают и имеют одинаковый характер роста. Меньшая величина ускорения твёрдой фазы на всех характерных участках сопла (кривая 2) объясняется плотностью частицы, значительно превышающей плотность рабочего тела.

Оценим соотношение скоростей потока и частицы, полученное нами с техническими характеристиками установок для порошковой высокоскоростной установки JP-5000, заявляемыми коммерческой иностранной фирмой Praxair Surface Technologies, входящей в состав TAFA Incorporated. Для нашего случая скорости потока и частицы на выходе из сопла: $W = 1099$ м/с, $V = 511,536$ м/с. Экспе-

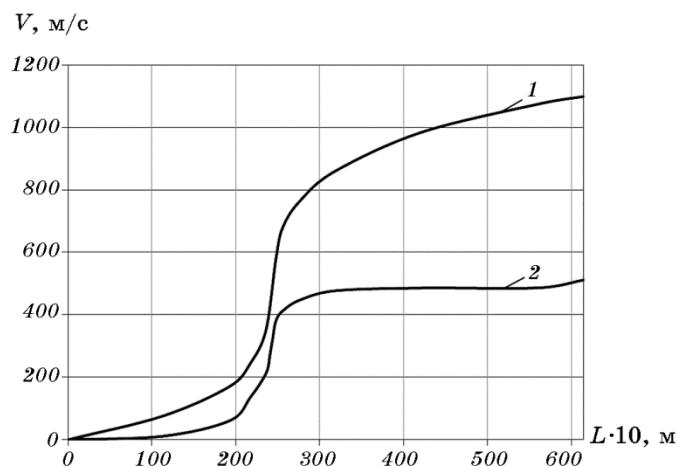


Рис. 1. График изменения скорости по каналу сопла (1 — изменение скорости потока; 2 — изменение скорости частицы).

риментальная высокоскоростная установка TAFA JP-5000 [13] является со следующими данными: $W = 2200$ м/с, $V = 1000\text{--}1300$ м/с. Нетрудно заметить, что соотношение скоростей частиц и потока (V/W) находится в одном диапазоне (0,47 — расчётная, 0,45–0,59 — для установки JP-5000).

Одним из важнейших критериев эффективности, характеризующим любой технологический процесс, в основе которого лежит контакт высокоскоростной частицы с подложкой, является кинетическая энергия частицы. В связи с этим, в качестве целевой функции, по которой следует производить оптимизацию процесса, необходимо выбрать кинетическую энергию частицы на выходе из сопла. А в качестве параметров оптимизации — характерный размер частицы и линейную скорость истечения газа из сопла. На наш взгляд, скорость истечения газа и диаметр частицы, с технологической точки зрения, являются наиболее удобными параметрами, по которым следует производить оптимизацию.

На графиках (см. рис. 2–4) представлены зависимости энергий частицы на выходе из сопла от скорости истечения газа и диаметра частицы. Как видим, с увеличением скорости истечения и диаметра частицы возрастает как кинетическая энергия, так и удельная кинетическая энергия частицы (энергия на единицу площади частицы). Это объясняется прямо пропорциональной зависимостью энергии от скорости потока и массы.

Зависимость удельной кинетической энергии, приходящейся на одну структурную единицу (атом, молекулу и др.), от скорости истечения газа и диаметра частицы представлена на (рис. 4). В этом случае характер влияния параметров противоположен. Увеличение

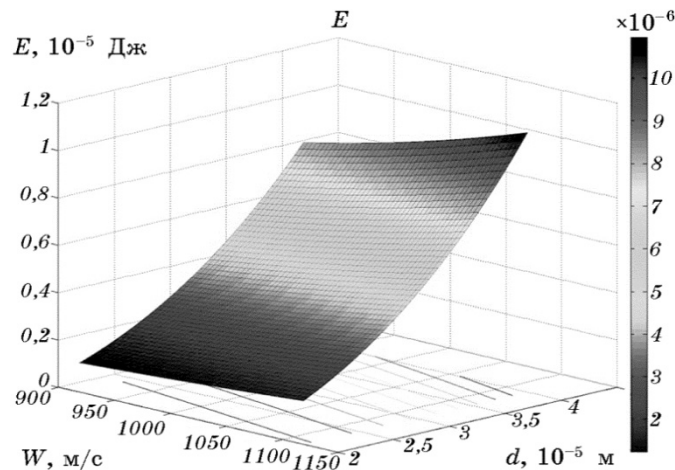


Рис. 2. Зависимость кинетической энергии частицы от скорости истечения газа из сопла и диаметра частицы.

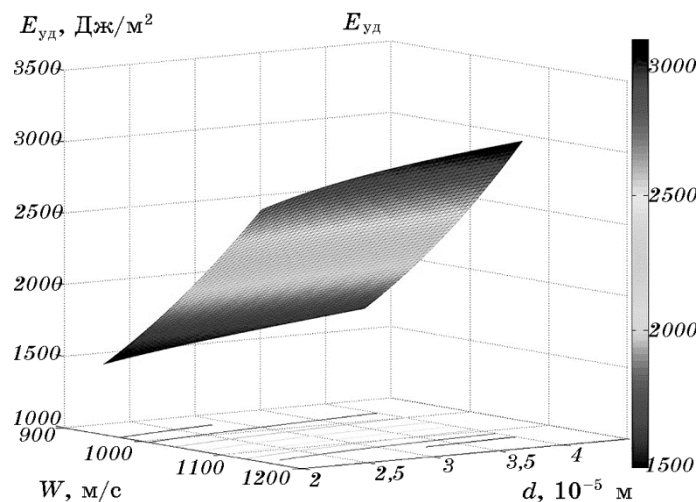


Рис. 3. Зависимость удельной кинетической энергии частицы от скорости истечения газа из сопла и диаметра частицы.

скорости истечения способствует росту удельной энергии на атом, в то время как увеличение диаметра частицы является причиной её уменьшения.

Расчёт энергий мы производили по следующим формулам:
 $E = mV^2/2$ — кинетическая энергия частицы, $\bar{E}_{уд} = E/S'$ — удель-

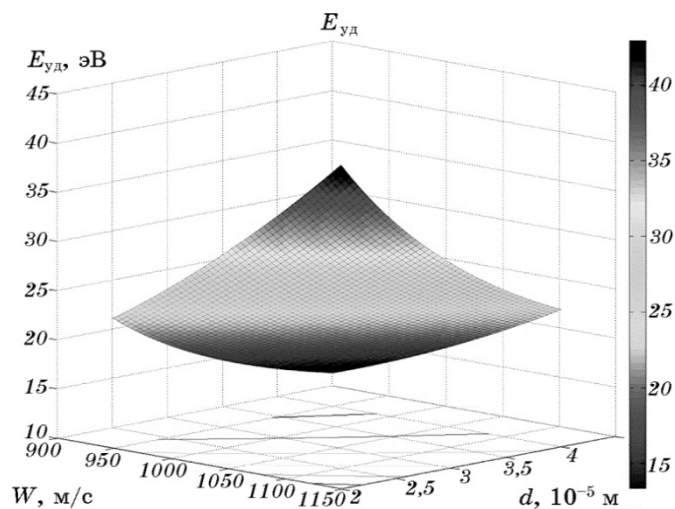


Рис. 4. Зависимость кинетической энергии, приходящейся на атом частицы, от скорости истечения газа из сопла и диаметра частицы.

ная кинетическая энергия частицы, $E_{уд} = \frac{E}{N \cdot 1,6019 \cdot 10^{-19}}$ — кинетическая энергия, приходящаяся на атом частицы; S' — половина площади поверхности частицы, N — число молекул вещества.

3.2. Деформационное упрочнение обработанной поверхности

Деформационное упрочнение является важным параметром качества, который оказывает непосредственное влияние на физическое состояние, а также эксплуатационные свойства поверхности детали. Величина деформационного упрочнения определяется измерением микротвёрдости поверхностного слоя и оценивается тремя показателями: глубиной, степенью и градиентом наклёпа.

Для установления расчётной зависимости глубины наклёпа поверхностного слоя от технологических условий струйно-абразивной обработки используем положение, что формирующиеся в поверхностном слое остаточные напряжения эквивалентны остаточным напряжениям, возникающим в результате удара отдельной дробинки [15]. Это даёт возможность представить обработку абразивом как дискретный процесс независимых последовательных ударов частиц без учёта перекрытия их отпечатков. Кроме того, описание общей интегральной картины процесса обработки легче осуществлять путём перехода от единичного акта взаимодействия частицы с подложкой.

Исследованием Я. Н. Отения [14] установлено, что глубина наклёпа:

$$h_H = \sqrt{P/(2\sigma_T)}. \quad (11)$$

Пренебрегая упругой деформацией частицы, нормальную силу удара P можно определить по формуле [15]:

$$P = 0,024R^2V^{\frac{6}{5}}\gamma^{\frac{3}{5}}E/(1-\mu^2), \quad (12)$$

где R — радиус частицы [м], V — скорость полёта частицы [м/с], γ — удельный вес материала частицы [кг/см³], E и μ — модуль упругости и коэффициент Пуассона до момента деформирования упруго-пластического тела.

Автором работы [14] на основе общей модели деформационного упрочнения металлов получено выражение для определения степени наклёпа при струйной обработке:

$$\Delta H = \frac{h_H \sigma_T}{0,4125HV_0(\sigma_B/\sigma_{B0})^{0,8}}, \quad (13)$$

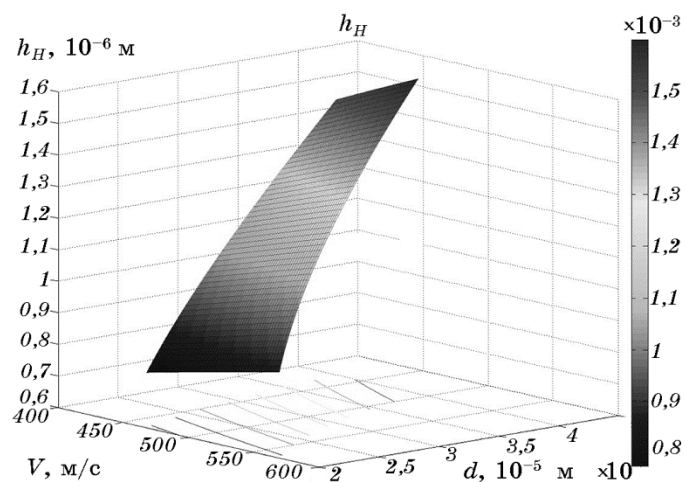


Рис. 5. Зависимость глубины наклёпа от скорости и диаметра частицы.

где h_H — глубина наклёпа в мкм, HV_0 — исходная микротвёрдость металла по Виккерсу, $\sigma_{BЭ}$ — предел прочности электротехнической стали, принятой за эталон [МПа], σ_B — предел прочности обрабатываемого материала [МПа], σ_T — предел текучести материала обрабатываемой детали [МПа].

На основании выражений (11)–(13), нами получены зависимости глубины и степени наклёпа подложки из стали 12Х18Н10Т части-

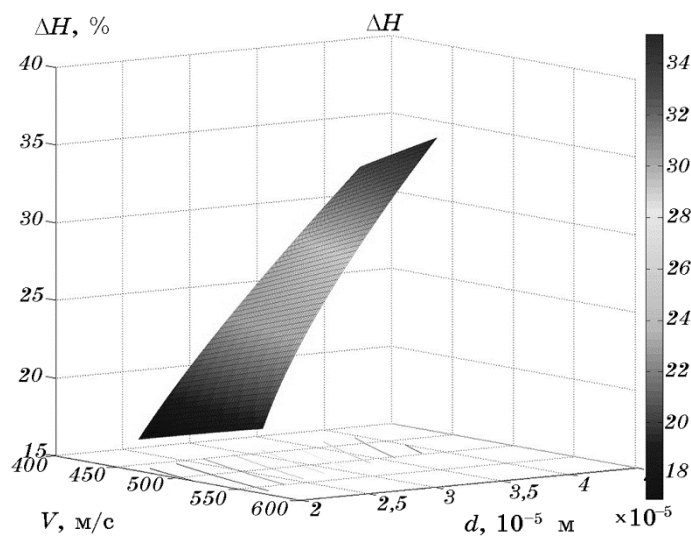


Рис. 6. Зависимость степени наклёпа от скорости и диаметра частицы.

цами алюминия от режимов струйной обработки, которые представлены на рис. 5, 6.

Как видим, увеличение скорости и диаметра абразивной частицы приводит к росту нормальной силы удара, что приводит к увеличению глубины и степени наклёпа поверхностного слоя (рис. 5, 6). Малая глубина наклёпа объясняется тем, что при моделировании в качестве дробы мы использовали частицы алюминия диаметром 20–30 мкм, для которых ранее нами был рассчитан диапазон скоростей на выходе из сопла (см. рис. 1 и комментарии к нему). Нетрудно показать, что при прочих равных условиях увеличение, как диаметра, так и плотности частиц (в случае использования крупнозернистого абразивного материала или чугуновой дробы) может существенно увеличить глубину наклёпа до сотен микрометров.

4. ВЫВОДЫ

1. Сформулирована проблема необходимости определения кинетической энергии частицы при струйно-абразивной обработке.
2. По аналогии с ускорением материальной точки введён параметр ускорения потока. Это позволило получить аналитические зависимости, описывающие изменение скорости частицы по тракту сопла, а также скорость при столкновении с подложкой.
3. Построены графические зависимости, которые дают возможность производить оптимизацию процесса обработки по кинетическим энергиям в зависимости от скорости истечения газа из сопла и характерного размера частицы.
4. Построены графики функциональных зависимостей глубины упрочнённого слоя и степени наклёпа от технологических параметров струйной обработки с целью оптимизации показателей качества при очистке и активации поверхности перед нанесением покрытия.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. С. В. Сергеев, Т. В. Лоза, А. П. Петренко, *Сб. науч. тр. «Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов»*, вып. 4 (76): 80 (2013).
2. А. А. Андилахай, *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Тематичний випуск «Технології в машинобудуванні»*, № 53: 4 (2010).
3. А. Е. Проволоцкий, *Струйно-абразивная обработка деталей машин* (Киев: Техника: 1989).
4. М. Г. Исупов, *Технология машиностроения*, № 2: 36 (2003).
5. В. Е. Архипов, А. Ф. Лондарский, А. Ф. Мельшанов, Г. В. Москвитин, М. С. Пугачёв, *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, вып. 4: 45 (2010).
6. Д. К. Зайцев, *Научно-технические ведомости СПбГПУ*, № 3 (59): 61 (2008).

7. К. А. Путилов, *Курс физики. Механика. Акустика. Молекулярная физика. Термодинамика* (Москва: Физматгиз: 1963).
8. И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев, *Справочник по математике для инженеров и студентов ВТУЗов* (Москва: Наука: 1986).
9. Г. А. Кравцов, *Уравнение Риккати и его общее решение*, <http://www.itsway.kiev.ua/pdf/Articles010306.pdf> (2006).
10. Г. А. Кравцов, *Уравнение Риккати. Теория и теорема Письменного–Прохоровой–Куржеевского*, <http://www.itsway.kiev.ua/pdf/Articles18012006.pdf> (2006).
11. А. А. Дорофеев, *Основы теории тепловых ракетных двигателей. Теория, расчёт и проектирование* (Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана: 2010).
12. Я. М. Шапиро, *Внешняя баллистика* (Москва: Оборонгиз: 1946).
13. *Praxair Surface Technologies* (Praxair Technology, Inc.: 2009); <http://www.praxairsurfacetechologies.com>.
14. С. Н. Бардинова, *Исследование качества поверхностного слоя при дробеструйной обработке в ремонтном производстве* (Рыбинск: РГАТУ: 2013).
15. А. С. Донсков, А. В. Прохоров, *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*, № 3: 69 (2010).

REFERENCES

1. S. V. Sergeev, T. V. Loza, and A. P. Petrenko, *Collection of Scientific Works 'Voprosy Proektirovaniya i Proizvodstva Konstruktsiy Letatel'nykh Apparatov'*, Iss. 4 (76), 80 (2013) (in Russian).
2. A. A. Andilakhay, *Visnyk Natsional' nogo Tekhnichnogo Universytetu 'HPI'. Tematichnyy Vypusk 'Tekhnologii v Mashynobuduvanni'*, No. 53: 4 (2010) (in Ukrainian).
3. A. E. Provolotskiy, *Struyno-Abrazivnaya Obrabotka Detaley Mashin [Abrasive-Jet Machining of Machinery Parts]* (Kiev: Tekhnika: 1989) (in Russian).
4. M. G. Isupov, *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, No. 2: 36 (2003) (in Russian).
5. V. E. Arkhipov, A. F. Londarskiy, A. F. Mel'shanov, G. V. Moskvitin, and M. S. Pugachev, *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, Iss. 4: 45 (2010) (in Russian).
6. D. K. Zaytsev, *Nauchno-Tekhnicheskie Vedomosti SPbGPU*, No. 3 (59): 61 (2008) (in Russian).
7. K. A. Putilov, *Kurs Fiziki. Mekhanika. Akustika. Molekulyarnaya Fizika. Termodinamika [Course of Physics. Mechanics. Acoustics. Molecular Physics. Thermodynamics]* (Moscow: Fizmatgiz: 1963) (in Russian).
8. I. N. Bronshteyn and K. A. Semendyaev, *Spravochnik po Matematike dlya Inzhenerov i Studentov VTUZov [Handbook of Mathematics for Engineers and Students of Higher Technical Colleges]* (Moscow: Nauka: 1986) (in Russian).
9. G. A. Kravtsov, *Uravnenie Rikkati i Ego Obshchee Reshenie*, <http://www.itsway.kiev.ua/pdf/Articles010306.pdf> (2006).
10. G. A. Kravtsov, *Uravnenie Rikkati. Teoriya i Teorema Pis'mennogo–Prohorovoy–Kurzheevskogo*, <http://www.itsway.kiev.ua/pdf/Articles18012006.pdf> (2006).

11. А. А. Dorofeev, *Osnovy Teorii Teplovykh Raketnykh Dvigatelay. Teoriya, Raschet i Proektirovanie [Fundamental of Theory of Heat Propulsion Engine. Theory, Calculation and Design]* (Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana: 2010) (in Russian).
12. Ya. M. Shapiro, *Vneshnyaya Ballistika [External Ballistics]* (Moscow: Oborongiz: 1946) (in Russian).
13. *Praxair Surface Technologies* (Praxair Technology, Inc.: 2009); <http://www.praxairsurfacetechologies.com>.
14. S. N. Bardinova, *Issledovanie Kachestva Poverkhnostnogo Sloya pri Drobestrurnoy Obrabotke v Remontnom Proizvodstve [Study of the Surface Layer Quality under Shot Blasting at the Repair Facilities]* (Rybinsk: RGATU: 2013) (in Russian).
15. A. S. Donskov and A. V. Prokhorov, *Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, Materialovedenie*, No. 3: 69 (2010) (in Russian).