DOI: 10.34220/2311-8873-2022-41-51

УДК 521.9.044

2.5.6 – технология машиностроения

К ВОПРОСУ ЗАЩИТЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И ИНСТРУМЕНТОВ ОТ ГАЗОАБРАЗИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

✉[1]**Попов Дмитрий Анатольевич**
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры машиностроительных технологий ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, РФ
e-mail: qaz.7@mail.ru

Кадырметов Анвар Минирович
доктор технических наук, зав. кафедрой машиностроительных технологий ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, РФ

Снятков Евгений Вячеславович
кандидат технических наук,
доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, РФ

Мандрыкин Игорь Александрович
аспирант 2 курса машиностроительного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, РФ

Аннотация.
Работа посвящена аналитическому обоснованию защиты технологических средств и инструмента от газоабразивного воздействия. Показано, что для снижения силы трения – основного фактора износа, необходимо наносить на поверхность твердые тонкие покрытия, обладающие микроупругостью.

Ключевые слова: ГАЗОАБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС, ПЛАЗМЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ, МИКРУПРУГОСТЬ.

TO THE QUESTION OF PROTECTION OF SURFACES OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT AND INSTRUMENTS FROM GAS-ABRASIVE IMPACT

✉[1]**Popov Dmitrii Anatolevich**
candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department of mechanical engineering technologies, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, RF
e-mail: qaz.7@mail.ru

Kadyrmetov Anvar Minirovich
doctor of technical sciences, professor head. department of engineering technologies Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, RF

Snyatkov Evgenii Vyacheslavovich
candidate of technical sciences, associate professor of production, repair and operation of cars Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, RF

Mandrikin Igor Aleksandrovich
2nd year postgraduate student of the faculty of mechanical engineering, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, RF

Аннотация.
The work is devoted to the analytical substantiation of the protection of technological means and tools from gas-abrasive impact. It is shown that in order to reduce the friction force, the main wear factor, it is necessary to apply hard thin coatings with microelasticity to the surface.

Keywords: GAS-ABRASIVE WEAR, PLASMA COATINGS, MICROELASTICITY.

[1]*Автор для ведения переписки*

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Часть технологических средств, используемых для обработки поверхностей, работает в условиях струйно-абразивного воздействия на их рабочие поверхности. Распространенными примерами таких средств являются рабочие поверхности пневмотранспортных установок, струйных мельниц, лопастей вертолетов, а также дробеструйных сопел, используемых для газоабразивной обработки поверхностей. Сопла для дробеструйной обработки поверхностей, как правило, выполняются из твердосплавных материалов и, несмотря на это, интенсивно изнашиваются. Износ сопел при этом приводит к нарушению газодинамического режима абразивно-струйной обработки.

Интенсивность изнашивания материалов определяется их свойствами и условиями трения [1-3]. Основными свойствами материала трущейся поверхности, определяющими её износостойкость, являются твердость, химический состав, структура, теплопроводность [4]. К условиям трения относятся сила трения, скорость трения, температура, наличие и свойства смазки и агрессивных веществ в зоне трения, площадь трения и конструктивные особенности зоны трения [1, 2].

В случае газоабразивного изнашивания поверхности разрушаются абразивными частицами путем срезания, выкрашивания, выбивания и многократного пластического деформирования поверхностных микрообъемов [5]. При этом известно, что интенсивность изнашивания зависит от факторов, включающих параметры частиц (свойств и формы), кинематические параметры (скорость и угол атаки частиц), температуру, степень запыленности газового потока, физико-механические свойства изнашиваемого материала [4, 5].

2 Материалы и методы

В рассматриваемом случае сухого взаимодействия абразивных частиц с поверхностью сопла при невысоких (нормальных) температурах основными факторами, определяющими изнашивание поверхности, являются твердость поверхности сопла [3], рост внутренних напряжений [6] и наклеп (для металлов и сплавов) и способность его к деформации [7], скорость частиц, определяющая силу трения [8].

Традиционно для износостойких деталей используют высокотвердые материалы. Для повышения надежности работы дробеструйных аппаратов используются не только современные твердосплавные материалы [4], но и покрытия со свойствами, обеспечивающими снижение интенсивности изнашивания внутренней поверхности сопла [9].

Что касается силы трения абразивных частиц о поверхность покрытий, то она является одним из основных управляемых факторов снижения интенсивности изнашивания. Сила трения $F_{\text{тр}}$ (н), в свою очередь, может быть уменьшена за счет снижения коэффициента трения $k_{\text{тр}}$ и нормальной к поверхности силы F_N (н):

$$F_{\text{тр}} = F_N \cdot k_{\text{тр}} \tag{1}$$

Сила нормального давления F_N пропорциональна деформации поверхности $x(t)$ (м) и её жесткости (коэффициенту упругости) k (н/м):

$$F_N = k \cdot x(t)\,, \tag{2}$$

где t – время, с.

Движение частицы в направлении, перпендикулярном к упругой поверхности во время контакта с ней, описывается уравнением:

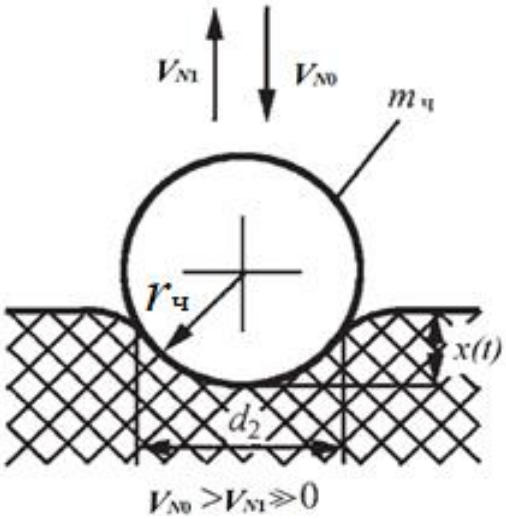


Рисунок 1 – Деформированный объем резиновой поверхности [8]

$$m_{прив} \cdot \ddot{x}(t) + k \cdot x(t) = 0\,, \qquad (3)$$

где $x(t)$ – деформация поверхности, м;

$m_{прив} = m_ч + m_{пр}$;

$m_ч$ – масса частицы, кг;

$m_{пр}$ – масса деформируемой части упругой поверхности (рис. 1), кг.

Решением уравнения (3) при начальных условиях $x(0) = 0$ и $\dot{x}(0) = V_N(0) = V_{N0}$ является

$$x(t) = \frac{V_{N0}}{\omega} sin\,\omega t\,, \qquad (4)$$

где

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m_{прив}}} \qquad (5)$$

Подставив в формулу (2) выражения (4) и (5) получим зависимость для величины нормальной к поверхности силы

$$F_N = k \cdot \frac{v_{NO}}{\omega} sin\,\omega t = V_{N0} \cdot sin\,\omega t \sqrt{m_{прив} \cdot k}\,, \qquad (6)$$

а для максимально возможной величины силы

$$F_{Nmax} = k \cdot \frac{v_{NO}}{\omega} = V_{N0}\sqrt{m_{прив} \cdot k}\,, \qquad (7)$$

из которого видно, что эта сила прямо пропорциональна $\sqrt{k}$. Соответственно сила трения будет определяться выражением

$$F_{тр} = k_{тр} \cdot V_{N0} \cdot sin\,\omega t \sqrt{m_{прив} \cdot k}\,, \qquad (8)$$

а максимальная сила трения – выражением

$$F_{тр\,max} = k_{тр} \cdot V_{N0}\sqrt{m_{прив} \cdot k}\,. \qquad (9)$$

Отсюда видно, что сила трения при прочих равных условиях определяется скоростью частиц V_{N0} и коэффициентом упругости поверхности k. Скорость частиц V_{N0} определяется соображениями технологических режимов и в нашем случае является неуправляемым фактором. В свою очередь, коэффициент упругости поверхности k является управляемым фактором, и может быть уменьшен для снижения нормальной к поверхности силы F_N до уровня, при котором не происходит разрушения поверхности.

Известно, что для снижения коэффициента упругости поверхностей, подвергаемых струйно-абразивному воздействию, используются резиновые покрытия [8, 10-13]. Однако в этом случае существенно повышаются коэффициенты трения. Например, коэффициент трения для трущейся пары материалов резина-чугун примерно в 4 раза превышает данный коэффициент для пары сталь-чугун [14]. Поэтому необходимо проведение анализа для выбора свойств поверхности из рассмотрения влияния на изнашивание двух факторов (коэффициента упругости поверхности и коэффициента трения о неё абразивных частиц).

3 Результаты исследований

1 Обоснование положительного эффекта амортизации пластинчатых пружин с эластичным покрытием в дробеструйных соплах.

Интегрально величина изнашивания определяется работой сил трения, и в рассматриваемом случае она в значительной степени определяется работой силы трения при взаимодействии абразивных частиц с поверхностью.

Предположим, что упругая поверхность контактирует с частицами абразива в условиях нагружения при постоянном коэффициенте трения. Предположим, что износ поверхности определяется работой сил трения. Для отдельно взятой абразивной частицы во время контакта с упругой поверхностью работа сил трения определяется выражением

$$\mathrm{A}_{\text{тр}} = \int_0^{S_{\text{тр}}} F_{\text{тр}}(t) \cdot dS_{\text{тр}}(t)\ , \tag{10}$$

где $S_{\text{тр}}$ – путь трения, м.

Для того, чтобы взять интеграл (10), определим движение частицы во время контакта с поверхностью. Рассмотрим случай упругого взаимодействия (без потерь на трение). Проекция движения частицы в направлении x (м), перпендикулярном поверхности, описывается зависимостью (4).

Движение частицы в направлении основного потока описывается уравнением

$$k \cdot k_{\text{тр}} x(t) + \dot{V}_m(t) \cdot m_{\text{ч}} = 0\ , \tag{11}$$

где $V_m(t)$ – проекция скорости частицы $V(t)$ в направлении основного потока, параллельной поверхности.

Решением уравнения (11) при начальных условиях:

$x(0) = 0$, $V_m(0) = V_{m0}$ является выражение:

$$V_m(t) = V_{m0} + \frac{m_{\text{прив}}}{m_{\text{ч}}} \cdot k_{\text{тр}} \cdot V_{N0}(cos\,\omega t - 1)\ . \tag{12}$$

Продифференцировав уравнение (4), имеем

$$V_N(t) = V_{N0} \cdot cos\,\omega t\ . \tag{13}$$

Тогда длина элементарного участка длины трения

$$dS_{\text{тр}} = V(t)\,dt = \sqrt{V_N^2(t) + V_m^2(t)}\ dt\ . \tag{14}$$

Подставив в интеграл (10) выражения (8), (14), (5), (12) и (13) и взяв его, получим работу силы трения при ударе частицы о поверхность

$$A_{\text{тр}} = -m_{\text{ч}} \cdot k_{\text{тр}} \sqrt{1 + k_{\text{тр}}^2} \cdot \left[C\sqrt{C^2 + D} - (C + V_{N0})\sqrt{(C + V_{N0})^2 + D} + D \cdot ln \frac{C + \sqrt{C^2 + D}}{C + V_{N0} + \sqrt{(C + V_{N0})^2 + D}}\right], \tag{15}$$

где

$$C = \frac{k_{\text{тр}} \cdot \left(V_{m0} - k_{\text{тр}} \cdot V_{N0}\right)}{1 + k_{\text{тр}}^2},$$

$$D = \frac{V_{m0}^2 + k_{\text{тр}}^2 \cdot V_{N0}^2 - 2 \cdot k_{\text{тр}} \cdot V_{m0} \cdot V_{N0}}{1 + k_{\text{тр}}^2} - C^2 .$$

Из выражения (15) видно, что работа сил трения, определяющая износ поверхности, не зависит от ее упругости (от коэффициента k). Это может быть объяснено тем, что при уменьшении коэффициента упругости k возрастает деформация поверхности в зоне контакта с частицей и, тем самым, возрастает путь трения $S_{\text{тр}}$, при этом работа сил трения не изменяется.

Известно, что износ поверхности при одинаковом пути трения зависит от условий нагружения поверхности контртелом (давления, скорости взаимного перемещения, температуры), и эта зависимость имеет ступенчатый характер [16]. Поэтому в нашем случае при одинаковых начальных условиях (скорости абразивной частицы в момент контакта с упругой поверхностью V_{N0} и равных других условиях) износ определяется коэффициентом трения $k_{\text{тр}}$ и значением нормальной к поверхности силы F_N. Сила F_N при этом не должна превосходить значения, при котором разрушается поверхность вследствие её недостаточной прочности. Согласно выражениям (6) и (8) уменьшение силы нормального давления F_N и силы трения $F_{\text{тр}}$ можно достичь снижением коэффициента упругости поверхности k.

Таким образом, коэффициент упругости k, с одной стороны, не влияет на работу сил трения, но, с другой стороны, влияет на силу F_N, которая при превышении определенных критических значений может приводить к высоким напряжениям и разрушению поверхности. Коэффициент упругости k определяет время взаимодействия частицы с поверхностью и, в соответствии с законом сохранения количества движения

$$F_N(t) = m\frac{dV_N(t)}{dt}, \tag{16}$$

уменьшает силу F_N . Уменьшение этой силы приводит к снижению давления на фактической площади контакта q_r (Па) и интенсивности изнашивания эластичной поверхности в соответствии с выражением [17]:

$$I_w \sim \frac{q_r^{t_u - 1}}{v+1}, \tag{17}$$

где I_w – интенсивность изнашивания; t_u – коэффициент усталости материала; v - коэффициент, характеризующий шероховатость поверхности абразивной частицы.

В соответствии с выражением (15) влияние коэффициента трения $k_{\text{тр}}$, скорости частицы $V_{\text{ч}}$ и угла атаки скорости α на работу трения A_{mp} при взаимодействии стальной частицы с резиновой поверхностью в пренебрежении потерь демпфирования представлено на рисунках 2 и 3.

Из графиков на рисунках 2 и 3 следует прямая зависимость работы сил трения от скорости частиц и коэффициента трения частиц о поверхность. Угол атаки α имеет зону оптимальности.

Уменьшение силы F_N с помощью коэффициента упругости поверхности k при неизменной начальной скорости частицы V_{N0} приводит согласно выражению (4) к увеличению максимальной деформации упругой поверхности x_{max}:

$$x_{max} = V_{N0}\sqrt{\frac{m_{\text{прив}}}{k}}. \tag{18}$$

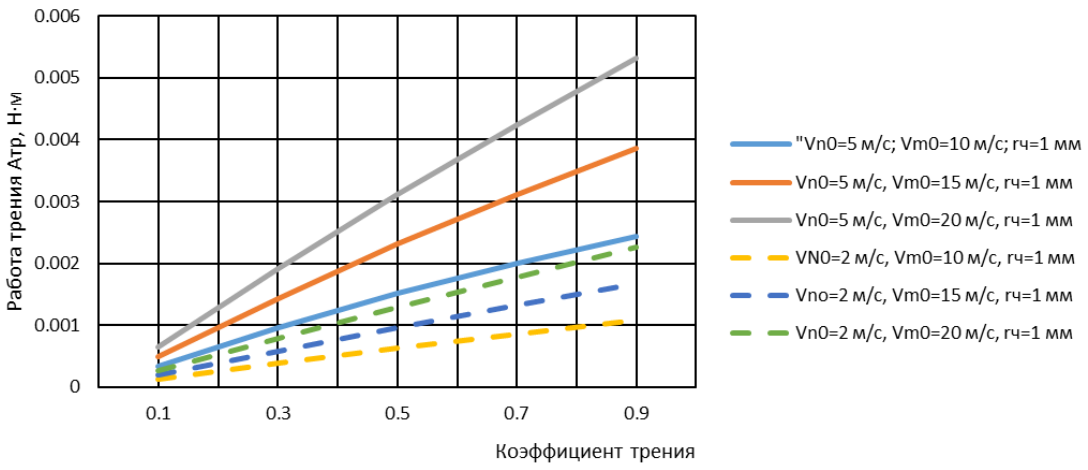
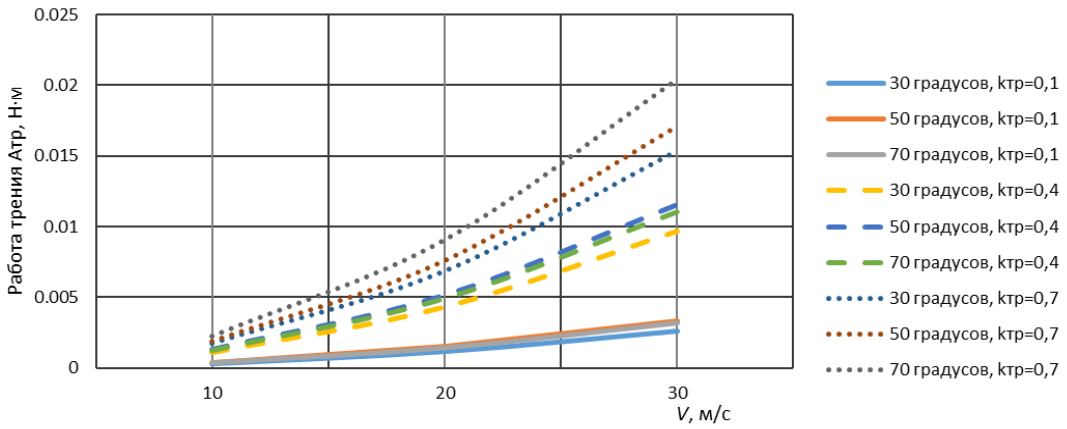
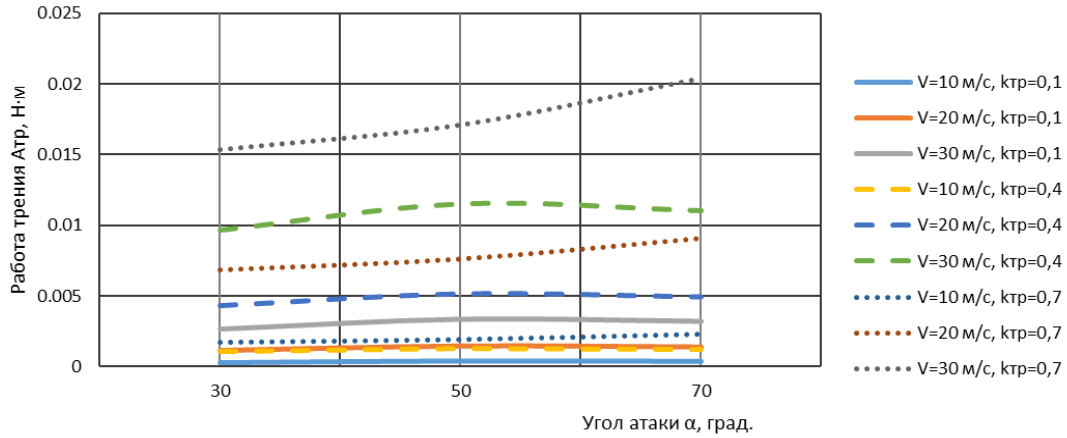


Рисунок 2 – Влияние коэффициента трения $k_{тр}$ при взаимодействии стальной частицы с резиновой поверхностью на работу трения частицы $A_{тр}$



а



б

Рисунок 3 – Влияние величины скорости частицы $V_ч$ (*а*) и угла её атаки α (*б*) на работу сил трения $A_{тр}$ при взаимодействии стальной частицы с резиновой поверхностью

Следовательно, для уменьшения степени разрушения поверхности и, соответственно, износа необходимо снизить ее жесткость, а следовательно, и твердость до определенного уровня, ниже которого не будет происходить разрушения поверхности. Однако за счет этого увеличивается максимальная деформация упругой поверхности.

Следует отметить, что формулы (2), (4) и (5) невозможно использовать для непосредственного расчета коэффициента упругости резины k (соответственно и других зависимостей с ним), т.к. это требует идентификации участка площади S_s и высоты h_s столба резины, принимающей ударные сжимающие нагрузки от абразивных частиц в соответствии с зависимостью [18]:

$$k = \frac{E_s \cdot S_s}{h_s}, \tag{19}$$

где E_s – модуль упругости резины, Па. Поэтому максимальную силу удара абразивной частицы сферической формы $F_{N\,max}$, диаметр контура давления на поверхность резины $d_{2\,\max}$, глубину внедрения абразивной частицы x_{max} и продолжительность удара τ оценивают с помощью уравнений теории Герца, адекватность которых выполняется при скоростях частиц до 20 м/с [8]:

$$F_{Nmax} = \frac{1{,}2 r_ч^2 \rho_ч^{3/5} V_0^{2/5}}{\theta^{2/5}}, \tag{20}$$

$$d_{2max} = 2{,}64 r_ч \rho_ч^{1,5} V_0^{2/5} \theta^{1/5}, \tag{21}$$

$$x_{max} = 1{,}3 r_ч \rho_ч^{2,5} V_0^{4/5} \theta^{2/5}, \tag{22}$$

$$\tau = \frac{5{,}15 r_ч^{2/5} \rho_ч^{3/5} \theta^{2/5}}{V_0^{1/5}}, \tag{23}$$

где θ – постоянная Кирхгофа: $\theta = \frac{1-\mu_п^2}{E_п} + \frac{1-\mu_ч^2}{E_ч}$; $\mu_п$, $\mu_ч$, $E_п$, $E_ч$ – коэффициенты Пуассона и модули упругости для материалов поверхности и частицы соответственно; $r_ч$, $\rho_ч$ – радиус (м) и плотность частицы (кг/м^3) соответственно.

Данные зависимости для диаметра абразивной частицы d = 1 мм представлены на рисунке 2 по данным работы [8]. В сравнении резиновой подложки со стальной сила удара уменьшается более чем в 20 раз при увеличении глубины внедрения частицы в поверхность в 7 … 10 раз и увеличении длительности удара в ~ 40 раз [8].

С другой стороны, использование в качестве амортизирующего элемента упругого материала, закрепленного непосредственно на поверхности, может привести, во-первых, к ситуации существенного отскока частиц в сторону потока, а, во-вторых, как было отмечено выше [14], для пары резина-чугун, – к увеличению коэффициента трения и, соответственно, работы сил трения и износа. Отскок частиц вызовет торможение потока и ухудшение характеристик дробеструйного сопла. Для уменьшения величины отскока целесообразно использовать эффект демпфирования упругой энергии различными способами, при котором величина отраженной от поверхности скорости $V_{N\text{отр}}$ будет меньше скорости V_{N0}

$$V_{N_{\text{отр}}} = k_v \cdot V_{N0}, \tag{24}$$

где k_v – оптимизируемый коэффициент демпфирования, $k_v < 1$.

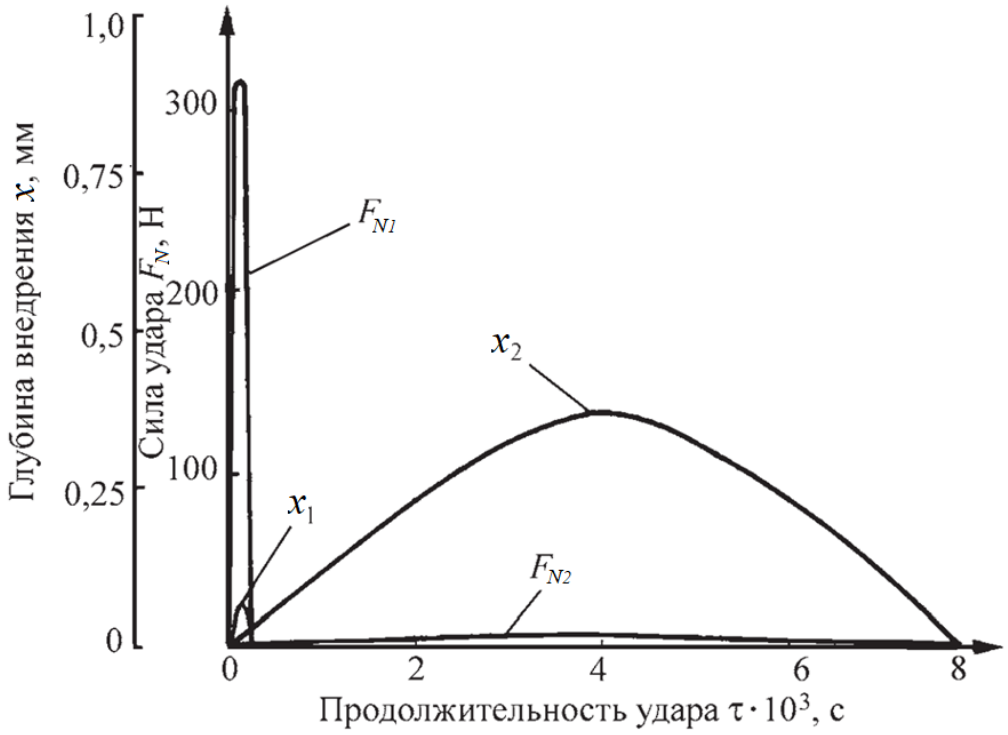


Рисунок 4 – Зависимость силы воздействия F_N стальной частицы на поверхность и её углубления x от продолжительности удара τ (V_{N0} = 10 м/с; E_1 = 2,1·105 МПа; E_2 = 4 МПа; Индексы: *1* – сталь, *2* – резина) [8]

Демпфирование осуществляется и самой резиной, но при этом разогревается сама резина, что сказывается на её долговечности [14, 15]. Для снижения коэффициента трения может быть использован подход, заключающийся в выполнении относительно тонкого антифрикционного покрытия на эластичном более толстом покрытии поверхности. Данное тонкое покрытие должно быть относительно более твердым в микромасштабе и достаточно гибким в макромасштабе. В связи с этим представляется целесообразным совместное использование демпфирования деформаций упругого слоя поверхности и выполнение на этом слое тонкого твердого износостойкого слоя.

2 Совместное использование амортизации и демпфирования.

В этом случае согласно закону сохранения энергии для положения максимальной деформации поверхности имеем

$$\frac{m_ч \cdot V_{N0}^2}{2} = \frac{k \cdot x_{max}^2}{2} + E_{Dc}\,, \tag{25}$$

где E_{Dc} – кинетическая энергия частицы, переходящая в тепловую (энергия, рассеянная в результате демпфирования) при сжатии поверхности. Из этого выражения следует, что

$$x_{Dmax} = \sqrt{\frac{1}{k}\left(m_ч \cdot V_{N0}^2 - 2E_{Dc}\right)}\,, \tag{26}$$

откуда видно, что частица массой $m_ч$ с начальной скоростью V_{N0}, вызовет уменьшение максимальной деформации при увеличении демпфирования E_{Dc} .

В случае амортизации без демпфирования энергии, согласно выражению (6), сила нормального давления F_N в процессе контакта частицы с упругой поверхностью меняется от

нуля до максимального возможного значения F_{Nmax} и обратно до нуля. При демпфировании эта же сила меняется от нуля до какого-то своего максимального значения, меньшего F_{Nm}, и от него снова меняется до нуля. Поэтому увеличение демпфирования E_D целесообразно проводить до тех пор, пока величина нормального давления частицы, определяемая суммой сил упругости поверхности и ее демпфирования, не превысит допустимого давления, при котором резко усиливается разрушение поверхности.

Из закона сохранения энергии также следует, что изменение кинетической энергии частицы, соответствующее скорости, перпендикулярной к упругой поверхности, за время контакта равно поглощенной демпфированием энергии

$$\frac{m_{ч} \cdot V_{N0}^2}{2} - \frac{m_{ч} \cdot V_{Nk}^2}{2} = E_D, \tag{27}$$

$$E_D = E_{Dc} + E_{De}, \tag{28}$$

где E_D – суммарная энергия демпфирования; E_{De} – кинетическая энергия частицы, переходящая в тепловую при возвращении поверхности в исходное состояние.

Следовательно, при демпфировании упругой поверхности происходит уменьшение модуля нормальной составляющей скорости к упругой поверхности.

Демпфирование удара частиц осуществляется и самой резиной, которая является эластичным материалом с долей поглощенной энергии при средней эластичности, составляющей в среднем 30 … 40 % от общей кинетической энергии частицы [8]. При этом уровень плотности поглощенной энергии резины составляет около 0,02 % плотности поглощенной энергии сталью. Поэтому, несмотря на низкие прочностные показатели резины и, соответственно, низкую энергию химических связей (12 … 15 кКал/моль) разрушение связей и микроучастков поверхности резины, при прочих равных условиях, будет маловероятным [8].

При высоких динамических нагрузках демпфирование ударов частиц может быть дополнительно осуществлено выполнением основы в виде пластинчатых пружин, установленных друг на друга в радиальном направлении сопла по типу рессор за счет трения их друг о друга. При этом демпфирование может быть осуществлено также при помощи каналов, соединяющих различные полости между собой или с внешней средой за счет гидравлического или пневматического трения в них за счет сопротивлений (жиклеров), например, при помощи каналов, соединяющих полость под поверхностью сопла с внешней средой. Величина демпфирования в этом случае определяется подбором геометрии этих каналов.

4 Обсуждение и заключение.

Для уменьшения износа технологических поверхностей, подверженных струйно-абразивному воздействию, необходимо, чтобы эти поверхности были упругими, а коэффициент упругости при этом выбирать небольшим.

Малый коэффициент упругости приводит к большим деформациям эластичного материала, поэтому для уменьшения отскока частиц в обратном направлении к потоку и предотвращения ухудшения его газодинамических характеристик необходимо использовать демпфирование кинетической энергии частиц механическим или газодинамическим методом.

Совместное использование эффектов демпфирования и амортизации технологических поверхностей при уменьшении нормальной силы удара частиц о них и уменьшении изнашивания за счет этого имеет следующие преимущества:

– уменьшается максимальная упругая деформация поверхности контакта, что приводит к меньшим возмущениям параметров струи дробеструйного сопла;

– гасятся нормальная к поверхности контакта составляющая скорости частицы при отражении от стенок, что приводит к уменьшению угла между векторами скорости каждой отскочившей частицы и основного потока, а это, в свою очередь, приводит к более компакт-

ной струе и уменьшению угла распыла на выходе из дробеструйного сопла и повышению его технологической эффективности.

Для уменьшения работы сил трения и изнашивания при использовании технологических эластичных поверхностей, подверженных струйно-абразивному воздействию, целесообразно покрывать последние тонким относительно твердым износостойким слоем, обладающим макроупругостью.

Список литературы

1 Основы трибологии : под ред. А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 2001. – 663 с.

2 Загайко, С. А. Основы теории трения и изнашивания : конспект лекций : / С. А. Загайко ; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа : УГАТУ, 2011 – 102 с.

3 Зорин, В. А. Надежность механических систем : учебник : / В. А. Зорин. – Москва : ИНФРА-М, 2021. – 380 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-16-010252-8. – Текст : электронный. – URL : https://znanium.com/catalog/product/1136796 (дата обращения: 11.08.2022). – Режим доступа : по подписке.

4 Денисова, Н. Е. Триботехническое материаловедение и триботехнология : учеб. пособие / Н. Е. Денисова, В. А. Шорин, И. Н. Гонтарь, Н. И. Волчихина, Н. С. Шорина / Под общей редакцией Н. Е. Денисовой. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. – 248 с.

5 Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. Под ред. акад. Б. Е. Патона : – М. : Машиностроение. – 1974. – 768 с.

6 Бирюков, В. П. Основы трибологии : Учебное пособие : – М. : РУТ (МИИТ). – 2018. – 175 с.

7 Кондрашов, Э. К. Эрозионностойкие лакокрасочные покрытия : / Э. К. Кондрашов, В. Н. Владимирский, Э. Я. Бейдер. – М. : Химия, 1989. – 135 с.

8 Пенкин, Н. С. Гуммированные детали машин / Н. С. Пенкин, В. Г. Копченков, В. М. Сербин, А. Н. Пенкин / под ред. д. т. н., проф. Н. С. Пенкина. 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2013. – 245 с.

9 Справочник по ремонту котлов и вспомогательного котельного оборудования / Под ред. В. Н. Шастина. – М. : Энергоиздат. – 1981. – 496 с.

10 Терещенко, В. Г. Износостойкость податливых покрытий из гуммировочных составов в газоабразивных средах : автореф. дис … канд. техн. наук : 05.02.04 / В. Г. Терещенко ; Северо-Кавказский государственный технический университет. – Ставрополь, 2006. – 20 с.

11 Копченков, В. Г. Метод оценки потерь энергии в эластомерах в условиях контактно-динамического нагружения / В. Г. Копченков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – № 13. – № 4(3). – С. 1077-1079.

12 Пенкин, Н. С. Гуммированные детали машин / Н. С. Пенкин. – М. : Машиностроение, 1977. – 200 с.

13 Пенкин, Н. С. Повышение износостойкости горнообогатительного оборудования / Пенкин Н. С., Капралов Е. П., Маляров П. В. и др. ; под ред. Н. С. Пенкина. – М. : Недра, 1992. – 264 с.

14 Основы технологии машиностроения. Справочник, Коэффициенты трения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://osntm.ru/kt_tren.html, свободный. – Загл. с экрана.

15 Кривенко, Н. Победить износ // Техника и наука. – 1986. – № 10. – 1986. – С. 18-21.

16 Бартеньев, Г. М. Трение и износ полимеров / Г. М. Бартеньев, В. В. Лаврентьев – Л. : Химия, 1972. – 240 с.

17 Трение, изнашивание и смазка: справочник / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – М. : Машиностроение. Т. 1. 1978. – 400 с. ; Т. 2., 1979. – 358 с.

18 Израелит, Г. Ш. Механические испытания резины и каучука / Г. Ш. Израелит. – Ленинград, М. : Гос. науч.-техн. изд-во химической литературы. – 1949. – 460 с.

References

1 Fundamentals of tribology : ed. A. V. Chichinadze. – M. : Mashinostroenie, 2001. – 663 p.

2 Zagaiko, S. A. Fundamentals of the theory of friction and wear : lecture notes / S. A. Zagaiko ; Ufimsk. state aviation tech. un-t. – Ufa : USATU, 2011 – 102 p.

3 Zorin, V. A. Reliability of mechanical systems: textbook : / V. A. Zorin. – Moscow : INFRA-M, 2021. – 380 p. – (Higher education). – ISBN 978-5-16-010252-8. – Text : electronic. – URL : https://znanium.com/catalog/product/1136796 (date of access: 08/11/2022). – Access mode : by subscription.

4 Denisova, N. E. Tribotechnical materials science and tribotechnology: textbook. allowance / N. E. Denisova, V. A. Shorin, I. N. Gontar, N. I. Volchikhina, N. S. Shorina / Edited by N. E. Denisova. – Penza : Penz Publishing House. state un-ta, 2006. – 248 p.

5 Technology of electric welding of metals and alloys by melting. Ed. acad. B. E. Paton : – M. : Mashinostroyeniye. – 1974. – 768 p.

6 Biryukov, V. P. Fundamentals of tribology : Textbook – M. : RUT (MIIT). – 2018. – 175 p.

7 Kondrashov, E. K. Erosion-resistant paint coatings / E. K. Kondrashov, V. N. Vladimirsky, E. Ya. Beider. – M. : Chemistry, 1989. – 135 p.

8 Penkin, N. S. Rubberized machine parts / N. S. Penkin, V. G. Kopchenkov, V. M. Serbin, A. N. Penkin / ed. d. t. s., prof. N. S. Penkina. 2nd ed., revised. and additional – M. : Mashinostroenie, 2013. – 245 p.

9 Handbook for the repair of boilers and auxiliary boiler equipment / Ed. V. N. Shastina. – M. : Energoizdat. – 1981. – 496 p.

10 Tereshchenko, V. G. Wear resistance of pliable coatings from gumming compositions in gas-abrasive media : author. dis ... cand. tech. Sciences : 05.02.04 / V. G. Tereshchenko ; North Caucasian State Technical University. – Stavropol, 2006. – 20 p.

11 Kopchenkov, V. G. Method for estimating energy losses in elastomers under contact-dynamic loading / V. G. Kopchenkov // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2011. – № 13. – № 4 (3). – S. 1077-1079.

12 Penkin, N. S. Rubberized machine parts / N. S. Penkin. – M. : Mashinostroenie, 1977. – 200 p.

13 Penkin, N. S. Improving the wear resistance of mining and processing equipment / Penkin N. S., Kapralov E. P., Malyarov P. V. and others; ed. N.S. Penkina. – M. : Nedra, 1992. – 264 p.

14 Fundamentals of engineering technology. Handbook, Coefficients of Friction. [Electronic resource]. – Access mode : http://osntm.ru/kt_tren.html, free. – Zagl. from the screen.

15 Krivenko, N. Defeating wear and tear // Technique and science. – 1986. – № 10. – 1986. – S. 18-21.

16 Barteniev, G. M. Friction and wear of polymers / G. M. Barteniev, V. V. Lavrentiev – L. : Chemistry, 1972. – 240 p.

17 Friction, wear and lubrication: a reference book / ed. I. V. Kragelsky, V. V. Alice. – M. : Mechanical engineering. T. 1. 1978. – 400 p. ; T. 2., 1979. – 358 p.

18 Israelite, G. Sh. Mechanical testing of rubber and rubber / G. Sh. Israelite. – Leningrad, M. : State. sci.-tech. publishing house of chemical literature. – 1949. – 460 p.

© Попов Д.А., Кадырметов А.М., Снятков Е.В., Мандрыкин И.А., 2022