

УДК 531.3 (575.2) (04)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА УДАРНЫХ СИСТЕМ МАШИН ДЛЯ ВИБРОУДАРНОЙ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В.Э. Еремьянц, Л.Т. Панова, А.А. Асанова

Рассмотрены критерии качества ударных систем машин для очистки поверхностей и приведены расчетные формулы, позволяющие осуществлять выбор рациональных параметров этих систем, удовлетворяющих критериям качества.

Ключевые слова: удар; двухслойная пластина; колебания; очистка поверхностей.

Главными критериями качества любой машины являются её производительность, энергоёмкость и долговечность. Первые два критерия связаны с эффективностью передачи энергии от машины к обрабатываемому объекту для совершения полезной работы, а третий – связан с напряжениями, действующими в элементах машины и допускаемыми напряжениями для данной конструкции и материала элемента.

В соответствии с этим при проектировании виброударной машины для очистки внутренних поверхностей бункеров, труб, кузовов и т.п. возникает задача выбора её рациональных параметров, удовлетворяющих следующим требованиям.

1. Максимальные напряжения в инструменте σ_u должны быть меньше напряжений, допускаемых по условию его прочности при циклических нагрузках:

$$\sigma_u < [\sigma_{ul}]. \quad (1)$$

2. Коэффициент передачи энергии от машины в обрабатываемый объект η должен быть по возможности большим:

$$\eta \rightarrow \eta_{max}. \quad (2)$$

3. Глубина остаточной вмятины от инструмента на обрабатываемой поверхности α_{nl} должна быть меньше заданной допускаемой величины:

$$\alpha_{nl} < [\alpha_{nl}]. \quad (3)$$

4. Максимальные напряжения на обрабатываемой поверхности σ_n , исключая контактную зону с инструментом, не должны выходить за пределы допускаемых по условию прочности:

$$\alpha_{nm} < [\alpha_n]. \quad (4)$$

5. Напряжения в слое отложений σ_c должны быть достаточными для его разрушения:

$$\sigma_c < [\sigma_{sc}]. \quad (5)$$

Для выполнения условий (1) – (5) необходимо знать зависимости перечисленных характеристик от параметров ударной системы. Такие зависимости могут быть получены на основе результатов предшествующих работ [1–6], где рассматривалась ударная система, показанная на рис. 1.

В модели этой системы боек ударной машины 1 (рис. 1) представлялся в виде жесткого недеформируемого тела массой m с податливой сферической ударной поверхностью радиусом R_1 . Инструмент 2 моделировался упругим стержнем длиной L , с диаметром d и площадью поперечного сечения S . Торцевой стержня, опирающийся на поверхность обрабатываемого объекта, сферический с радиусом сферы R_2 .

Обрабатываемый объект – стальная пластина 3 толщиной δ_1 , на внутренней поверхности которой имеется слой отложений шлака 4 толщиной δ_2 . Принимается, что модуль упругости E_1 коэффициент Пуассона μ_1 и плотность ρ_1 материалов бойка, инструмента и пластины одинаковые. Аналогичные характеристики для шлака обозначены через E_2 , μ_2 и ρ_2 .

В модели пластина со слоем отложений приводится к однослойной толщиной $\delta = \delta_1 + \delta_2$, в соответствии с методикой, описанной в работе [6].

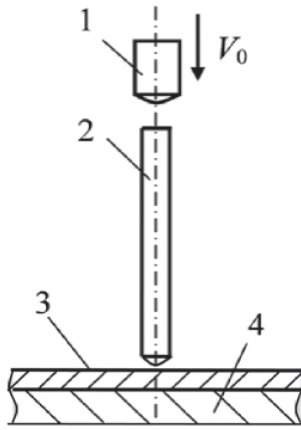


Рис. 1

Рассмотрим каждое из условий (1) – (5).

Напряженное состояние инструмента. Исследования, проведенные в работах [1–3, 5] показывают, что наибольшие напряжения сжатия возникают в инструменте при распространении по нему начальной волны деформации, генерируемой при ударе бойком по инструменту. Усилия в этой волне $P_1(t)$ и её длительность τ_1 описываются зависимостями:

$$P_1(t) = -2\rho_1 a S V_0 \left(\frac{h}{\lambda}\right) e^{-hat{a}t} \sin \lambda at, \quad \tau_1 = \frac{\pi}{a\lambda}. \quad (6)$$

Эти усилия достигают максимального значения

$$P_{1m} = -2\rho_1 a S V_0 \left(\frac{h}{k}\right) \exp\left(-\frac{h}{\lambda} \arctg \frac{\lambda}{h}\right) \quad (7)$$

в момент времени

$$t_{1m} = \frac{1}{a\lambda} \arctg\left(\frac{\lambda}{h}\right), \quad (8)$$

где a – скорость распространения продольной волны деформации в инструменте, $a = (E_1/\rho_1)^{0.5}$; V_0 – скорость соударения бойком с инструментом;

$$h = c_1 / 2E_1 S, \quad \lambda^2 = k^2 - h^2, \quad k^2 = c_1 / m a^2,$$

c_1 – приведенный коэффициент жесткости контактной характеристики бойка с инструментом, определяемый из линеаризованной зависимости Герца как

$$c_1 = 1,25 K_1^{2/3} P_{1m}^{1/3}, \quad K_1 = \frac{2E_1}{3(1-\mu_1^2)} \sqrt{R_1}. \quad (9)$$

Усилия в контакте инструмента с пластиной во время действия начальной волны деформации ($0 < t < \tau_1$) описываются выражением [1–3]:

$$P_2(t) = -B_0 e^{-hat{a}t} \left(\frac{g}{\lambda} \sin \lambda at - \cos \lambda at - C_0 e^{-gat} \right), \quad (10)$$

а по окончании действия начальной волны ($t > \tau_1$):

$$P_2(t) = P_2(\tau_1) e^{-sa(t-\tau_1)}. \quad (11)$$

При упругих контактных деформациях коэффициент C_0 , входящий в формулу (10), в течение всего времени взаимодействия инструмента с пластиной равен минус единице ($C_0 = -1$), а остальные коэффициенты находятся из соотношений:

$$B_0 = \frac{2bc_1 V_0}{aH_1}, \quad g = s - h, \quad s = b + \beta, \quad H_1 = \lambda^2 + g^2, \quad (12)$$

$$b = \frac{c_2}{ES}, \quad \beta = \frac{c_2}{8a\sqrt{Dm_0}},$$

D – приведенная цилиндрическая жесткость двухслойной пластины; m_0 – её приведенная масса, отнесенная к одному квадратному метру [6]:

$$D = \frac{E_1^2 \delta_1^4 + 4E_1 E_2 \delta_1^3 \delta_2 + 6E_1 E_2 \delta_1^2 \delta_2^2 + 4E_1 E_2 \delta_1 \delta_2^3 + E_2^2 \delta_2^4}{12(E_1 \delta_1 + E_2 \delta_2)}, \quad m_0 = \rho_1 \delta_1 + \rho_2 \delta_2, \quad (13)$$

c_2 – приведенный коэффициент жесткости контактной характеристики инструмента и пластины, определяемый при упругой деформации по формулам:

$$c_2 = 1,25 K_2^{2/3} P_{2m}^{1/3}, \quad K_2 = \frac{2E_1}{3(1-\mu_1^2)} \sqrt{R_2}. \quad (14)$$

Контактные усилия (10) достигают максимального значения P_{2m} в момент времени t_{2m} , который находится численно из уравнения:

$$\frac{\lambda^2 - hg}{\lambda s} \sin \lambda at_{2m} + \cos \lambda at_{2m} = e^{-gat_{2m}}. \quad (15)$$

При достаточно большой жесткости контактной характеристики c_2 и отношении диаметра инструмента к толщине пластине, таких, что $\exp(-gat_{2m}) \ll 1$, правую часть в уравнении (15) можно принять равной нулю. В этом случае значения t_{2m} , P_{2m} и время взаимодействия инструмента с пластиной τ_2 в первом приближении можно найти аналитически по формулам:

$$t_{2m} = \frac{1}{a\lambda} \arctg\left(\frac{\lambda s}{hs - k^2}\right), \quad P_{2m} = -\frac{2bc_1 V_0}{ak\sqrt{H_1}} \exp(-hat{a}t_{2m}), \quad (16)$$

$$\tau_2 = \frac{\pi + \arctg(\lambda / g)}{a\lambda}. \quad (17)$$

Усилия в волне деформации, отраженной от пластины в инструмент, определяются как

$$P_{om}(t) = P_2(t) - P_l(t). \quad (18)$$

Максимальные значения усилий сжатия и растяжения в отраженной волне находятся из формулы (18) численным методом.

При упругопластических деформациях пластины контактная характеристика состоит из двух ветвей (рис. 2). На этапе нагрузки (ветвь 1) она описывается функцией:

$$P_2 = K_3 \alpha^n, \quad 0 < \alpha < \alpha_m,$$

а на этапе разгрузки (ветвь 2) – функцией

$$P_2 = K_2 (\alpha - \alpha_{пл})^{3/2}, \quad \alpha_{пл} < \alpha < \alpha_m,$$

где K_3, n – коэффициенты, определяемые по формулам, приведенным в работе [7, 8]; α – местная контактная деформация; $\alpha_{пл}, \alpha_m$ – остаточная пластическая (27) и максимальная контактная деформации:

$$\alpha_m = (P_{2m}/K_3)^{1/n}.$$

На каждом этапе проводится линейризация контактной характеристики методом Бидермана. При этом коэффициент контактной жесткости линейризованной модели на этапе нагрузки определяется по формуле

$$c_2 = \frac{n+1}{2} K_3^{1/n} P_{2m}^{(n-1)/n}, \quad (19)$$

а на этапе разгрузки – по формулам:

$$c_2 = 1,25 K_2^{2/3} P_{2m}^{1/3}, \quad K_2 = \frac{P_{2m}}{(\alpha_{пл} - \alpha)^{3/2}}. \quad (20)$$

Зависимость контактного усилия от времени описывается по-прежнему функцией (10), в которой коэффициенты (12) при возрастании деформации на интервале времени $0 < t < t_{2m}$ определяются с учетом коэффициента жесткости, найденного по формуле (19), а на этапе разгрузки ($t_{2m} > t > \tau_2$), – вычисленного по формуле (20). При этом в формуле (10) на интервале времени $0 < t < t_{2m}$ следует принять $C_0 = -1$, а на интервале времени $t_{2m} > t > \tau_2$:

$$C_0 = \left(\frac{P_{2m}}{B_0} e^{hat{a}t_{2m}} + \frac{g}{\lambda} \sin \lambda a t_{2m} - \cos \lambda a t_{2m} \right) e^{g a t_{2m}}. \quad (21)$$

Используя формулы (7), (10), (18), можно найти максимальные напряжения сжатия $(\sigma_u)_m$ растяжения в инструменте:

$$(\sigma_u)_m = P_{1m} / S, \quad (\sigma_{om})_m = P_{om} / S,$$

определить коэффициент асимметрии цикла нагрузки $(\sigma_{om})_m / (\sigma_{ll})_m$ и подобрать параметры системы, удовлетворяющие условию (1).

Коэффициент передачи энергии удара в обрабатываемый объект. В соответствии с решением, полученным в [2, 3], коэффициент передачи энергии бойка в инструмент равен

$$\eta_1 = \frac{A_u}{A_0} = 1 - e^{-\frac{2\pi h}{\lambda}}, \quad (22)$$

где A_u – энергия начальной волны деформации, сформированной в инструменте; A_0 – кинетическая энергия бойка в начальный момент удара,

$$A_0 = mV_0^2 / 2.$$

Коэффициент передачи энергии удара в пластину может быть найден как:

$$\eta = \frac{A_u - A_{om}}{A_0} = \eta_1 - \frac{A_{om}}{A_0}, \quad (23)$$

где $A_{от}$ – энергия волны, отраженной от пластины.

При упругой контактной характеристике:

$$\frac{A_{om}}{A_0} = \frac{4b^2 k^2}{H_1^2} \left[B_2 \left(1 - e^{-\frac{2\pi h}{\lambda}} \right) - B_3 \left(1 + e^{-\frac{\pi(h+s)}{\lambda}} \right) + \frac{2h}{s} \left(1 - e^{-\frac{2\pi s}{\lambda}} \right) \right] + \frac{P_2^2(\tau_1)}{2A_0 s E_1 S} (1 - e^{-sa(\tau_2 - \tau_1)}), \quad (24)$$

где $H_2 = \lambda^2 + (s+h)^2$, $B_1 = \frac{\lambda^2 - b^2 + (\beta - h)^2}{2b\lambda}$, $B_2 = \frac{k^2 + (h + B_1\lambda)^2}{k^2}$, $B_3 = \frac{8h(h+s+B_1\lambda)}{H_2}$.

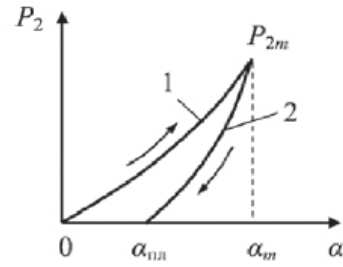


Рис. 2

При упругопластической контактной характеристике:

$$\frac{A_{om}}{A_0} = \frac{A_{om1} + A_{om2} + A_{om3}}{A_0} = \frac{a}{A_0 E_1 S} \left(\int_0^{t_{2m}} P_{om}^2(t) dt + \int_{t_{2m}}^{\tau_1} P_{om}^2(t) dt + \int_{\tau_1}^{\tau_2} P_{om}^2(t) dt \right). \quad (25)$$

Интегралы, входящие в выражение (25), имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} \frac{A_{om1}}{A_0} &= \frac{4b^2 k^2}{H_1^2} \left\{ B_2 + e^{-2hat_{2m}} \left[B_4 (\cos 2\lambda at_{2m} + B_5 \sin 2\lambda at_{2m}) - (1 + B_1^2) \right] - \right. \\ &\quad \left. - B_3 \left[1 - e^{-(h+s)at_{2m}} (\cos \lambda at_{2m} + B_6 \sin \lambda at_{2m}) \right] + \frac{2h}{s} (1 - e^{-2sat_{2m}}) \right\}, \\ \frac{A_{om2}}{A_0} &= \frac{4b^2 k^2}{H_1^2} \left\{ e^{-2hat_{2m}} \left[1 + B_1^2 - B_4 (\cos 2\lambda at_{2m} + B_5 \sin 2\lambda at_{2m}) \right] - B_2 e^{-2hat_{2m}} - \right. \\ &\quad \left. - B_3 C_0 \left[e^{-(s+h)a\tau_1} + e^{-(h+s)at_{2m}} (\cos \lambda at_{2m} + B_6 \sin \lambda at_{2m}) \right] - \frac{2C_0^2 h}{s} (e^{-2sat_{2m}} - e^{-2sa\tau_1}) \right\}, \\ \frac{A_{om3}}{A_0} &= \frac{P_2^2(\tau_1)}{2sE_1SA_0} (1 - e^{-2sa(\tau_2 - \tau_1)}). \end{aligned}$$

где

$$B_4 = \frac{(B_1 h - \lambda)^2 - k^2}{k^2}, \quad B_5 = \frac{h[\lambda(1 - B_1^2) - 2B_1 h]}{(B_1 h - \lambda)^2 - k^2}, \quad B_6 = \frac{B_1(s + h) - \lambda}{s + h + B_1 \lambda}.$$

Коэффициент жесткости и другие коэффициенты, входящие в первый интеграл, определяются с учетом соотношения (19), а коэффициенты второго и третьего интеграла находятся с учетом соотношений (20).

Энергия, переданная в пластину, делится на две части. Это энергия, затраченная на пластические деформации поверхности пластины $A_{пл}$ и энергия, затраченная на колебания пластины A_k . Очевидно, что для обеспечения наилучшего отделения шлака от пластины без существенного повреждения её поверхности необходимо, чтобы составляющая энергии A_k возрастала, а составляющая $A_{пл}$ — уменьшалась.

Таким образом, эффективность использования энергии для совершения полезной работы можно оценить коэффициентом η_k равным отношению энергии колебаний пластины к начальной энергии бояка: $\eta_k = A_k / A_0$.

Энергия, затраченная на пластическую деформацию с учетом принятой контактной характеристики (рис. 2), определяется как:

$$A_{nl} = \int_0^{\alpha_m} K_3 \alpha^n d\alpha - \int_{\alpha_{nl}}^{\alpha_m} K_2 (\alpha - \alpha_{nl})^{3/2} d\alpha,$$

или после вычисления интегралов:

$$A_{nl} = \frac{1}{n+1} K_3 \alpha_m^{(n+1)} - \frac{2}{5} K_2 (\alpha_m - \alpha_{nl})^{5/2}. \quad (26)$$

Зная $A_{от}$ и $A_{пл}$ можно найти энергию, затрачиваемую на колебания пластины, из баланса энергий:

$$A_{ku} = A_{om} - A_{nl} - A,$$

затем найти коэффициент перехода энергии удара в энергию колебаний пластины и подобрать параметры системы, обеспечивающие наибольшее значение этого коэффициента.

Величина остаточной вмятины на поверхности пластины. При упругопластической деформации поверхности пластины в зоне контакта с инструментом глубина остаточной вмятины $\alpha_{пл}$ на поверхности определяется формулой, предложенной М.С. Дроздом [8]:

$$\alpha_{nl} = \frac{P_0 - P_2}{2\pi R_2 HD_\delta}, \quad (27)$$

где P_0 — усилие, при котором начинается пластическая деформация контактной поверхности пластины; $HD_\delta = HD\eta_{HD}$; HD — пластическая твердость материала пластины; η_{HD} — коэффициент, учитывающий динамичность нагрузки. В соответствии с данными работы [8]:

$$P_0 = 11 \left(\frac{2R_2}{10} \right)^2 \exp \left[1,9(10^{-3} HD - 1)^{0,668} \right], H;$$

$$HD = \frac{88300}{130 - HRB} (MПа), \quad \eta_{HD} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{137}{HD} \alpha_m + \sqrt{1 + \frac{2250 \alpha_m}{HD}} \right),$$

где R_2 измеряется в мм, HD в МПа; HRB – твердость материала по шкале B Роквелла; \dot{a}_m – максимальная скорость контактной деформации (м/с), которая может быть найдена численно из формулы [7]:

$$\alpha = \frac{4bhV_0}{H_1} e^{-hat} \left(\frac{k^2 - bh}{b\lambda} \sin \lambda at + \cos \lambda at - e^{-(s-h)at} \right). \quad (28)$$

Определив максимальную скорость контактной деформации, и зная твердость материала пластины по Роквеллу HRB , можно найти величины P_0 и HD_d , а затем, вычислив максимальную контактную силу по формулам (10) или (16), найти глубину остаточного отпечатка на поверхности пластины (27) и подобрать параметры ударной системы таким образом, чтобы выполнялось условие (3).

Напряжения на поверхности пластины и в слое шлака. Расчет напряжений в двухслойной пластине представляет собой довольно громоздкую задачу и связан с необходимостью разложения колебаний пластины по собственным формам и частотам и последующим суммированием, как показывает работа [9] минимум 25 первых гармоник колебаний.

Поэтому для оценки максимальных напряжений на поверхности пластины и в слое шлака используется приближенный метод. Для этого вначале двухслойная пластина приводится к однослойной с параметрами, определяемыми по формуле (13). Предполагается, что пластина достаточно большая в плане и при ударе по центру пластины волны, отраженные от её краев, не оказывают влияния, по крайней мере, на первое взаимодействие инструмента с пластиной.

Тогда при расположении начала координатных осей x и y в центре пластины амплитудную функцию для прогиба пластины можно представить в виде:

$$w(x, y) = W_0 \cos \xi x \cos \xi y, \quad (29)$$

где W_0 – постоянная, определяемая из условия, что в момент окончания удара прогиб центра пластины имеет максимальную величину; $\xi = \pi/\Lambda$, Λ – длина полуволны, распространяющейся по пластине.

Прогиб центра пластины в момент окончания действия контактной силы P_2 при упругой контактной характеристике вычисляется по формуле:

$$W_0 = \frac{4hV_0\beta}{ak^2s} \left[1 + e^{-\frac{\pi h}{\lambda}} - \frac{k^2}{H_1} \left(e^{-\frac{\pi h}{\lambda}} + e^{-\frac{\pi s}{\lambda}} \right) e^{-sa(\tau_2 - \tau_1)} \right], \quad (30)$$

где коэффициент жесткости c_2 рассчитывается по формулам (14).

При упругопластической контактной характеристике:

$$W_0 = W_{01} + W_{02} + W_{03}, \quad (31)$$

где

$$W_{01} = \frac{B_0\beta}{c_2k^2} \left[\frac{H_1}{s} - e^{-hat_{2m}} \left(\frac{gh + \lambda^2}{\lambda} \sin \lambda at_{2m} + (g-h) \cos \lambda at_{2m} \right) - \frac{k^2}{s} e^{-sat_{2m}} \right], \quad (32)$$

$$W_{02} = \frac{B_0\beta}{c_2k^2} \left[(g-h) e^{-ha\tau_1} - \frac{C_0k^2}{s} (e^{-sa\tau_{2m}} - e^{-sa\tau_1}) + e^{-hat_{2m}} \left(\frac{gh + \lambda^2}{\lambda} \sin \lambda at_{2m} + (g-h) \cos \lambda at_{2m} \right) \right], \quad (33)$$

$$W_{03} = \frac{B_0\beta}{c_2s} (e^{-ha\tau_1} - C_0 e^{-sa\tau_1}) (1 - e^{-sa(\tau_2 - \tau_1)}), \quad (34)$$

τ_2 – время взаимодействия инструмента с пластиной, определяемое из уравнения (11) или по приближенной формуле (17).

В формуле (32) на этапе нагружения коэффициент c_2 и зависящие от него коэффициенты b , β , s , g , H_1 , B_1 определяются с учетом формулы (19), а в формулах (33), (34) – на этапе разгрузки – с учетом формул (20).

Для нахождения коэффициента ξ обратимся к рис. 3. На нем видно, что длина изгибной полуволны в момент окончания действия силы составляет:

$$\Lambda = 2a_n \tau_2, \quad (35)$$

где a_n – скорость распространения изгибной волны в пластине.

Скорость распространения гармонической волны изгиба в пластине определяется соотношением [11]:

$$a_n = \sqrt[4]{D\omega^2 / m_0}, \quad (36)$$

где ω – круговая частота волны.

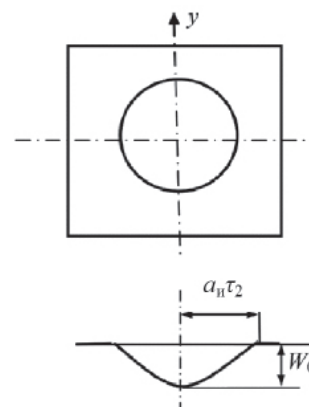


Рис. 3

Внешнюю силу, действующую на пластину, в первом приближении можно считать гармонической с круговой частотой основной гармоники $\omega = a\lambda$. Тогда можно записать:

$$\Lambda = 2\tau_2 \sqrt{D(a\lambda)^2 / m_0}, \quad \xi = \frac{\pi}{2\tau_2} \left(\frac{m_0}{D(a\lambda)^2} \right)^{1/4}. \quad (37)$$

Деформации, возникающие в пластине при изгибе, определяются по формулам:

$$\varepsilon_x = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad \varepsilon_y = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \quad (38)$$

где z – координата сечения по нормали к нейтральной поверхности.

Известно [10], что при действии на пластину сосредоточенной силы деформации и напряжения в точке её приложения стремятся к бесконечности и достоверные результаты получаются только на расстоянии от точки приложения силы превышающем две толщины пластины. Учитывая это, амплитудное значение деформаций вдоль осей x и y в точках, удаленных от центра пластины на расстояние 2δ , с учетом соотношений (29), (38) будет выражаться зависимостью:

$$\varepsilon_m = -z W_0 \xi^2 \cos 2\xi\delta. \quad (39)$$

Напряжения в пластине и в слое шлака вычисляются по формулам:

$$\sigma_{xi} = \frac{\bar{E}_i}{1-\mu^2} (\varepsilon_{xi} + \mu\varepsilon_{yi}), \quad \sigma_{yi} = \frac{\bar{E}_i}{1-\mu^2} (\varepsilon_{yi} + \mu\varepsilon_{xi}), \quad (40)$$

где – соответственно приведенные модули упругости и коэффициент Пуассона при представлении двухслойной пластины как однослойной.

Приведенные модули упругости и коэффициент Пуассона, а также расстояние от внешней поверхности двухслойной пластины до нейтральной плоскости z_0 находятся из соотношений [6]:

$$\mu = \frac{\mu_1 \bar{E}_1 \delta_1 + \mu_2 \bar{E}_2 \delta_2}{\bar{E}_1 \delta_1 + \bar{E}_2 \delta_2}, \quad \bar{E}_i = \frac{E_i}{1-\mu_i^2}, \quad (i=1,2), \quad z_0 = \frac{E_1 \delta_1^2 + 2E_2 \delta_1 \delta_2 + E_2 \delta_2^2}{2(E_1 \delta_1 + E_2 \delta_2)}, \quad (41)$$

где индекс 1 соответствует материалу пластины, а индекс 2 – материалу шлака. Обычно коэффициент Пуассона для шлака лежит в пределах 0,10 – 0,15, при этом, как показывают расчеты [4], при определении напряжений с погрешностью, не превышающей 2% можно принять $\mu = \mu_1$.

Подставляя выражение (39) в формулы (40) и принимая $z = z_0$, $\varepsilon_{xm} = \varepsilon_{ym}$, получим амплитудное значение напряжений в центральной зоне пластины:

$$\sigma_n = \frac{E_1 z_0}{(1-\mu_1^2)(1-\mu)} W_0 \xi^2 \cos 2\xi\delta. \quad (42)$$

Амплитудные значения напряжений для внешней поверхности слоя шлака, расположенного на внутренней стороне пластины, будут равны:

$$\sigma_c = \frac{E_2 (\delta_1 + \delta_2 - z_0)}{(1-\mu_2^2)(1-\mu)} W_0 \xi^2 \cos 2\xi\delta. \quad (43)$$

Если края пластины жестко заземлены, то из-за наложения отраженных от них волн напряжения у краев пластины могут увеличиться по сравнению с напряжениями, найденными по формулам (42), (43). При свободных краях пластины увеличение напряжений может произойти в её центральной зоне.

Поэтому при малых размерах сторон пластины выбор параметров ударной системы, удовлетворяющих условию (4), должен производиться с учетом граничных условий на краях пластины.

Необходимо отметить, что напряжения в пластине будут наибольшими, когда толщина слоя шлака на её внутренней поверхности стремится к нулю ($\delta_2 = 0$ и $\delta = \delta_1$), а остаточная вмятина от инструмента на поверхности пластины будет наибольшей, когда слой шлака имеет наибольшую толщину. Это следует учитывать при удовлетворении условий (4) и (5).

Использование приведенных формул позволяет подобрать параметры ударной системы таким образом, чтобы удовлетворялись условия (1) – (5), обеспечивающие требуемые качества машины.

Литература

1. Еремьянц В.Э., Панова Л.Т. К задаче о продольном ударе по стержню, опирающемуся на пластину // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 4. С. 58–63.
2. Еремьянц В.Э. Расчет ударных процессов в машинах: учебно-методическое пособие: в 8-ми ч. Ч. 8. Модели поперечного удара по пластине. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2007. 63 с.
3. Еремьянц В.Э. Динамика ударных систем: учебное пособие: в 2-х ч. Ч. 2. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2011. 323 с.

4. *Еремьянц В.Э., Панова Л.Т., Нью В.В.* Влияние характеристик слоя отложений на поверхности пластины на напряжения в слое и пластине при поперечной деформации // *Современные техника и технологии в научных исследованиях: Тез. докл.* Бишкек: Научная станция РАН, 2010. С. 30–31.
5. *Еремьянц В.Э., Слепнев А.А.* Волны деформации, генерируемые при продольном ударе в стержне, опирающемся на пластину // *Матер. IV Межд. конф. “Проблемы механики современных машин”.* Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2009. С. 175–178.
6. *Королев В.И.* Упруго-пластические деформации оболочек. М.: Машиностроение, 1971. 320 с.
7. *Еремьянц В.Э.* Упругопластическая модель ударной системы “боек-волновод-пластина” // *Вестник КРСУ.* 2010, Т. 10. № 10. С. 134–139.
8. *Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И.* Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. М.: Машиностроение, 1986. 220 с.
9. *Асанова А.А.* Влияние числа учитываемых гармоник на результаты расчета колебаний балки при поперечном ударе // *Современные техника и технологии в научных исследованиях: Матер. 3-й конф. молодых ученых и студентов.* Бишкек: Научная станция РАН, 2011. С. 31 – 32.
10. *Бидерман В.Л.* Механика тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1977. 488 с.
11. *Борьба с шумом на производстве: справочник / Под ред. Е.Я. Юдина.* М.: Машиностроение, 1985. 400 с.