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, энергоемкость 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 $\sigma_и$ должны быть меньше напряжений, допускаемых по условию его прочности при циклических нагрузках:

$$\sigma_И < [\sigma_И]. \tag{1}$$

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

$$\eta \to \eta_{max}. \tag{2}$$

3. Глубина остаточной вмятины от инструмента на обрабатываемой поверхности $\alpha_{пл}$ должна быть меньше заданной допускаемой величины:

$$\alpha_{пл} < [\alpha_{пл}]. \tag{3}$$

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

$$\alpha_{пт} < [\alpha_п]. \tag{4}$$

5. Напряжения в слое отложений $\sigma_с$ должны быть достаточными для его разрушения:

$$\sigma_с < [\sigma_{вс}]. \tag{5}$$

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. Торец 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].

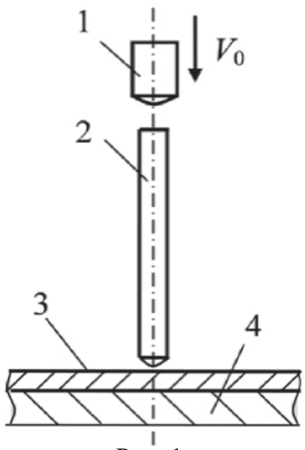

Рис. 1

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:

$$P_1(t) = -2\rho_1 aSV_0\left(\frac{h}{\lambda}\right)\mathrm{e}^{-hat}\sin\lambda at,\ \tau_1 = \frac{\pi}{a\lambda}. \tag{6}$$

Эти усилия достигают максимального значения

$$P_{1m} = -2\rho_1 aSV_0\left(\frac{h}{k}\right)\exp\left(-\frac{h}{\lambda}\operatorname{arctg}\frac{\lambda}{h}\right) \tag{7}$$

в момент времени

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

где a – скорость распространения продольной волны деформации в инструменте, $a = (E_1/\rho_1)^{0,5}$; V_0 – скорость соударения бойка с инструментом;

$$h = c_1/2E_1S,\quad \lambda^2 = k^2 - h^2,\quad k^2 = c_1/ma^2,$$

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

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

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

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

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

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

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:

$$B_0 = \frac{2bc_1V_0}{aH_1},\ g = s - h,\ s = b + \beta,\ H_1 = \lambda^2 + g^2, \tag{12}$$

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

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

$$D = \frac{E_1^2\delta_1^4 + 4E_1E_2\delta_1^3\delta_2 + 6E_1E_2\delta_1^2\delta_2^2 + 4E_1E_2\delta_1\delta_2^3 + E_2^2\delta_2^4}{12\left(E_1\delta_1 + E_2\delta_2\right)},\ m_0 = \rho_1\delta_1 + \rho_2\delta_2., \tag{13}$$

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

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

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

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

При достаточно большой жесткости контактной характеристики c_2 и отношении диаметра инструмента к толщине пластине, таких, что $\exp(-gat_{2m}) << 1$, 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:

$$t_{2m} = \frac{1}{a\lambda}\operatorname{arctg}\left(\frac{\lambda s}{hs - k^2}\right),\quad P_{2m} = -\frac{2bc_1V_0}{ak\sqrt{H_1}}\exp\left(-hat_{2m}\right), \tag{16}$$

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

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

$$P_{om}(t) = P_2(t) - P_1(t). \tag{18}$$

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

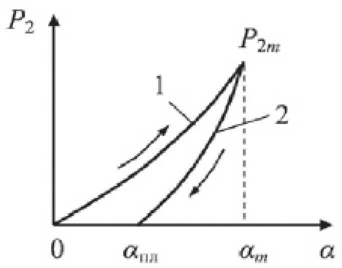

Рис. 2

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

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

а на этапе разгрузки (ветвь 2) – функцией

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

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

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

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

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

а на этапе разгрузки – по формулам:

$$c_2 = 1{,}25 K_2^{2/3} P_{2m}^{1/3}, \qquad K_2 = \frac{P_{2m}}{\left(\alpha_{mпл} - \alpha\ \right)^{3/2}}. \tag{20}$$

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 $t_{2m} > t > \tau_2$:

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

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

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

определить коэффициент асимметрии цикла нагрузки $(\sigma_{om})_m / (\sigma_И)_m$ 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

$$\eta_1 = \frac{A_u}{A_0} = 1 - \mathrm{e}^{-\frac{2\pi h}{\lambda}}, \tag{22}$$

где $A_и$ – 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:

$$\eta = \frac{A_u - A_{om}}{A_0} = \eta_1 - \frac{A_{om}}{A_0}, \tag{23}$$

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

При упругой контактной характеристике:

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

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

При упругопластической контактной характеристике:

$$\frac{A_{от}}{A_0}=\frac{A_{от1}+A_{от2}+A_{от3}}{A_0}=\frac{a}{A_0E_1S}\left(\int_0^{t_{2m}}P_{от}^2(t)\,dt+\int_{t_{2m}}^{\tau_1}P_{от}^2(t)\,dt+\int_{\tau_1}^{\tau_2}P_{от}^2(t)\,dt\right). \tag{25}$$

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

$$\frac{A_{от1}}{A_0}=\frac{4b^2k^2}{H_1^2}\Big\{B_2+\mathrm{e}^{-2hat_{2m}}\left[B_4\left(\cos 2\lambda at_{2m}+B_5\sin 2\lambda at_{2m}\right)-\left(1+B_1^2\right)\right]-$$

$$-B_3\left[1-\mathrm{e}^{-(h+s)at_{2m}}\left(\cos\lambda at_{2m}+B_6\sin\lambda at_{2m}\right)\right]+\frac{2h}{s}\left(1-\mathrm{e}^{-2sat_{2m}}\right)\Big\},$$

$$\frac{A_{от2}}{A_0}=\frac{4b^2k^2}{H_1^2}\Big\{\mathrm{e}^{-2hat_{2m}}\left[1+B_1^2-B_4\left(\cos 2\lambda at_{2m}+B_5\sin 2\lambda at_{2m}\right)\right]-B_2\mathrm{e}^{-2ha\tau_1}-$$

$$-B_3C_0\left[\mathrm{e}^{-(s+h)a\tau_1}+\mathrm{e}^{-(h+s)at_{2m}}\left(\cos\lambda at_{2m}+B_6\sin\lambda at_{2m}\right)\right]-\frac{2C_0^2h}{s}\left(\mathrm{e}^{-2sat_{2m}}-\mathrm{e}^{-2sa\tau_1}\right)\Big\},$$

$$\frac{A_{от3}}{A_0}=\frac{P_2^2(\tau_1)}{2sE_1SA_0}\left(1-\mathrm{e}^{-2sa(\tau_2-\tau_1)}\right).$$

где

$$B_4=\frac{\left(B_1h-\lambda\right)^2-k^2}{k^2},\quad B_5=\frac{h[\lambda\left(1-B_1^2\right)-2B_1h]}{\left(B_1h-\lambda\right)^2-k^2},\qquad B_6=\frac{B_1(s+h)-\lambda}{s+h+B_1\lambda}.$$

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 бойка: $\eta_k = A_k/A_0$.

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

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

или после вычисления интегралов:

$$A_{пл}=\frac{1}{n+1}K_3\alpha_m^{(n+1)}-\frac{2}{5}K_2\left(\alpha_m-\alpha_{пл}\right)^{5/2}. \tag{26}$$

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

$$A_{ku}=A_{от}-A_{пл}-A,$$

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]:

$$\alpha_{пл}=\frac{P_{2m}-P_0}{2\pi R_2HD_д}, \tag{27}$$

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

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

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

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]:

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

Определив максимальную скорость контактной деформации, и зная твердость материала пластины по Роквеллу *HRB*, можно найти величины P_0 и $\mathrm{H}D_{д}$, 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:

$$w(x,y) = W_0\cos\xi x\cos\xi y, \tag{29}$$

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:

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

где коэффициент жесткости c_2 рассчитывается по формулам (14).

При упругопластической контактной характеристике:

$$\mathrm{W}_0=\mathrm{W}_{01}+\mathrm{W}_{02}+\mathrm{W}_{03}, \tag{31}$$

где

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

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

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

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_i, B_i 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:

$$\Lambda = 2a_и\tau_2, \tag{35}$$

где $a_и$ – скорость распространения изгибной волны в пластине.

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

$$a_и = \sqrt[4]{D\omega^2/m_0}, \tag{36}$$

где ω – круговая частота волны.

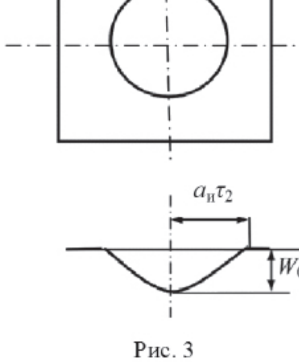

Рис. 3

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

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

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

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

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:

$$\varepsilon_m = -zW_0\xi^2 \cos 2\xi\delta. \tag{39}$$

Напряжения в пластине и в слое шлака вычисляются по формулам:

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

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]:

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

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:

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

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

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

Если края пластины жестко защемлены, 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., Ню 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.