

УДК 531.3,534.1/.2

**ПРЕДЕЛЬНАЯ СКОРОСТЬ СОУДАРЕНИЯ БОЙКА  
С ИНСТРУМЕНТОМ В УДАРНОЙ СИСТЕМЕ “БОЕК-ИНСТРУМЕНТ-ПЛАСТИНА”**

*В.Э. Еремьянц, В.В. Ню*

Определены предельные скорости соударения бойка с инструментом по условию обеспечения прочности пластины. Установлены зависимости этой скорости от параметров ударной системы.

*Ключевые слова:* боек; инструмент; пластина; слой отложений; скорость удара; волны деформации; напряжения.

**ULTIMATE STRIKER AND TOOL IMPACT VELOCITY  
IN THE “STRIKER-TOOL-PLATE” PERCUSSIVE SYSTEM**

*V.E. Eremjants, V.V. Niu*

Ultimate velocities of striker and tool impact by the condition of the plate's strength providing are discovered. Dependences of these velocities on parameters of the impact system are established.

*Key words:* striker; tool; plate; slag layer; impact velocity; strain waves; stress.

В предыдущей статье [1] (см. наст. сборник), рассмотрена ударная система виброударной машины для очистки внутренних поверхностей пластин от различных отложений, и найдена зависимость напряжений, возникающих в пластине, от параметров ударной системы. Установлено, что напряжения в пластине достигают максимальных значений в конце её очистки, когда пластина свободна от отложений, причем их величина намного больше напряжений в инструменте и бойке. Эти напряжения ограничивают скорость соударения бойка с инструментом, а, следовательно, и энергию удара, которая может быть передана в пластину без её необратимых деформаций.

В задачи данной работы входило установление зависимости предельной скорости удара от параметров элементов ударной системы, при которой в пластине (исключая зону контакта инструмента с пластиной) не возникает необратимых деформаций.

В работе [1] установлено, что напряжения в пластине, свободной от шлака, определяются по формуле:

$$\sigma_n = \frac{2\chi V_0 \rho_1 a}{(1-\mu_1^2)(1-\mu)} (1+q) \times \left[ 1 - \frac{\Theta}{4}(1-q)(1-\exp(-p)) \right], \quad (1)$$

где

$$q = (\chi v^2 - 1) / (\chi v^2 + 1);$$

$$\chi = \pi \sqrt{3(1-\mu_1^2)} / 16;$$

$$v = d / \delta_1; \quad \Theta = ES / cl;$$

$$c = 1,25 K^{\frac{2}{3}} P_{km}^{\frac{1}{3}};$$

$$K = \frac{2E_1}{3(1-\mu_1^2)} \sqrt{r},$$

$$P_{km} = P_1(1-q)(1-\exp(-p)); \quad (2)$$

$$p = 4 / \Theta(1-q). \quad (3)$$

Расчеты показывают [2], что в большинстве практических случаев значение параметра  $p$ , входящего в формулу (1), больше пяти. При этом выполняется условие  $\exp(-p) < 0,0067$ . Эта величина составляет менее 1 % от единицы, и этим слагаемым в выражении (1) и далее можно пренебречь, записав его в более коротком виде:

$$\sigma_n = \frac{2\chi V_0 \rho_1 a}{(1-\mu)} (1+q) \left[ 1 - \frac{\Theta}{4}(1-q) \right].$$

Приравнивая в последней формуле напряжения в пластине к допускаемым  $[\sigma_n]$ , и выражая из нее скорость удара, получим:

$$[V_0] = \frac{[\sigma_n](1-\mu)}{2\chi\rho_1 a(1+q)[1-0,25\Theta(1-q)]}. \quad (4)$$

В качестве допускаемых напряжений для пластины принят предел пропорциональности её материала.

Последующие преобразования:

$$1+q = 2\chi v^2 / (\chi v^2 + 1);$$

$$1-q = 2 / (\chi v^2 + 1);$$

$$\Theta = \rho_1 a^2 \pi d^2 / 4lc;$$

$$3(1-\mu_1^2) = 2^8 \chi^2 / \pi^2;$$

$$K = \frac{E_1 \pi^2}{2^7 \chi^2} \sqrt{r},$$

$$P_{km} = 0,5\rho a S[V_0](1-q) = \frac{\rho a \pi d^2}{4(\chi v^2 + 1)} [V_0],$$

и их подстановка в формулу (4) позволяют получить общее выражение, отражающее связь предельной скорости соударения с параметрами элементов ударной системы:

$$[V_0] = \frac{[\sigma_n](1-\mu)(1+\chi v^2)}{4\chi^2 v^2 \rho_1 a \left[ 1 - \frac{16(\chi d)^{4/3}}{5l\pi(\chi v^2 + 1)^{2/3}} \cdot \left( \frac{2a\pi}{r[V_0]} \right)^{1/3} \right]}. \quad (5)$$

Предельная скорость  $[V_0]$  находится из этого выражения методом последовательных приближений.

В качестве примера рассмотрена система с параметрами:  $E_1 = 20,4 \cdot 10^{10}$  Па;  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>;  $a = 5100$  м/с;  $\mu = \mu_1 = 0,3$ ;  $\chi = 0,3244$ ;  $[\sigma_n] = 180$  МПа. Исходя из конструктивных соображений, на длину бойка и радиус контактной поверхности инструмента введены ограничения:  $l \leq 0,3$  м,  $r \geq 0,06$  м.

Определив из соотношения (5) предельную скорость удара, можно затем найти максимальные напряжения в инструменте  $\sigma_u$ :

$$\sigma_u = 0,5\rho_1 a [V_0], \quad (6)$$

максимальную силу в контакте инструмента с пластиной  $P_{km}$ :

$$P_{km} = \sigma_u S(1-q), \quad (7)$$

массу бойка  $m$  и энергию удара  $A_0$ , которая может быть подведена к пластине без ее разрушения:

$$m = \rho_1 S l; \quad A_0 = 0,5m [V_0]^2, \quad (8)$$

коэффициент жесткости контакта инструмента с пластиной:

$$c = 1,378 \cdot 10^8 P_{km}^{1/3}, \quad (9)$$

коэффициент передачи энергии удара в пластину при действии на неё первой волны деформации, распространяющейся по инструменту [3]:

$$\eta_1 = 1 - q^2 - 0,125\Theta(1-q)^2(3q+1). \quad (10)$$

В таблице 1 приведены значения параметров, найденные по формулам (5)–(10), для пластин толщиной 6, 8, 10, 12 мм, при изменении отношения диаметра инструмента к толщине пластины  $v$  от 2 до 4. В последнем столбце этой таблицы приведены отношения параметров, полученных при  $v = 2$  к параметрам при  $v = 4$ .

Из данных таблицы видно, что во всех рассмотренных случаях величина  $p$  больше 5,9. При этом  $\exp(-p) < 0,0027$ , что пренебрежимо мало по сравнению с единицей. Следовательно, сделанное ранее допущение о возможности пренебрежения этим членом правомерно во всем исследованном диапазоне значений.

Из данных таблицы также следует, что с увеличением коэффициента  $v$  от 2 до 4 предельная скорость соударения бойка с инструментом уменьшается в 1,37–1,44 раза. Во столько же раз уменьшаются и напряжения в волне деформации, генерируемой в инструменте при ударе. Меньшие значения из указанных диапазонов изменения параметров соответствуют большей толщине пластины. Снижение напряжений в инструменте при увеличении величины  $v$  связано с изменением его диаметра. При этом максимальные усилия в контакте инструмента с пластиной изменяются незначительно – на 4,7–8,5 %.

Энергия, которая может быть передана по инструменту без разрушения пластины, с увеличением  $v$  от 2 до 4 возрастает в 1,93–2,14 раза. При этом меньшие значения изменений  $A_0$  соответствуют меньшей толщине пластины.

Столь существенное изменение энергии, передаваемой по инструменту, несмотря на уменьшение предельной скорости удара, связано с увеличением массы бойка, которая растет пропорционально  $v^2$ .

С увеличением  $v$  от 2 до 4 коэффициент передачи энергии в пластину  $\eta_1$  уменьшается в 1,90–2,28 раза, но при этом энергия, переданная в пластину  $A_n$ , возрастает на 2–5 %. Отсюда следует вывод, что с точки зрения передачи наибольшей энергии удара в пластину при наименьших напряжениях в инструменте, целесообразно стремиться к увеличению коэффициента  $v$  или, что то же самое, к увеличению диаметра инструмента.

В то же время, с изменением  $v$  в указанном диапазоне коэффициент контактной жесткости  $c$  изменяется всего на 1–3 %. Это изменение несущественно, что дает основание при предварительных расчетах в небольшом диапазоне изменения предударной скорости считать коэффициент жесткости  $c$  постоянной величиной.

Таблица 1 – Значения параметров процесса виброударной очистки поверхностей

Параметры	$\delta_1$ , мм	$\nu$				Отношение параметров	
		2	2,5	3	3,5		4
$q$		0,130	0,339	0,490	0,598	0,677	5,226
$[V_0]$ , м/с	6	4,185	3,571	3,238	3,037	2,907	0,695
	8	4,309	3,698	3,367	3,168	3,039	0,705
	10	4,450	3,844	3,516	3,319	3,192	0,717
	12	4,607	4,007	3,684	3,491	3,367	0,731
$\sigma_w$ , МПа	6	83,233	71,021	64,396	60,406	57,819	0,695
	8	85,713	73,557	66,974	63,015	60,450	0,705
	10	88,515	76,448	69,931	66,021	63,494	0,717
	12	91,635	79,695	73,276	69,439	66,967	0,731
$P_{km}$ , кН	6	8,194	8,291	8,362	8,413	8,451	1,031
	8	15,001	15,266	15,460	15,602	15,707	1,047
	10	24,206	24,790	25,223	25,541	25,778	1,065
	12	36,085	37,214	38,058	38,684	39,151	1,085
$A_0$ , Дж	6	2,317	2,636	3,121	3,738	4,473	1,930
	8	4,369	5,027	6,001	7,231	8,692	1,990
	10	7,280	8,484	10,223	12,403	14,983	2,058
	12	11,234	13,277	16,164	19,757	24,000	2,136
$\eta_1$	6	0,947	0,838	0,711	0,595	0,499	0,527
	8	0,931	0,816	0,689	0,574	0,479	0,515
	10	0,913	0,794	0,665	0,552	0,459	0,503
	12	0,895	0,770	0,641	0,529	0,438	0,490
$A_n = A\eta_1$ , Дж	6	2,194	2,208	2,218	2,225	2,230	1,016
	8	4,065	4,104	4,132	4,152	4,167	1,025
	10	6,647	6,735	6,799	6,846	6,880	1,035
	12	10,053	10,229	10,358	10,451	10,521	1,046
$m$ , кг	6	0,265	0,414	0,595	0,810	1,059	4,000
	8	0,470	0,735	1,059	1,441	1,882	4,000
	10	0,735	1,149	1,654	2,251	2,941	4,000
	12	1,059	1,654	2,382	3,242	4,234	4,000
$c \cdot 10^{-8}$ , Н/м	6	2,778	2,789	2,797	2,803	2,807	1,010
	8	3,399	3,418	3,433	3,443	3,451	1,015
	10	3,986	4,018	4,041	4,058	4,071	1,021
	12	4,554	4,601	4,635	4,660	4,679	1,028
$\Theta$	6	0,275	0,428	0,615	0,836	1,090	3,959
	8	0,400	0,622	0,891	1,209	1,576	3,939
	10	0,533	0,826	1,183	1,603	2,088	3,917
	12	0,672	1,039	1,485	2,010	2,615	3,893
$p$	6	16,691	14,131	12,741	11,903	11,359	0,681
	8	11,486	9,743	8,796	8,226	7,856	0,684
	10	8,622	7,329	6,627	6,205	5,931	0,688
	12	6,840	5,828	5,279	4,948	4,734	0,692

Наиболее значимые изменения претерпевают безразмерные параметры  $q$  и  $\Theta$ . С увеличением  $\nu$  от 2 до 4 параметр  $q$  возрастает в 5,23 раза, а параметр  $\Theta$  – почти в 4 раза. Ростом этих параметров и объясняется снижение коэффициента передачи энергии удара бойка в пластину  $\eta_1$ .

Следует отметить, что при наличии на внутренней поверхности пластины слоя отложений, приведенная толщина пластины возрастает, а приведенный коэффициент  $\nu_c$  [1] уменьшается. При этом в начале процесса очистки пластины коэффициент  $\eta_1$  может быть существенно выше, по сравнению с приведен-

ными в таблице 1. Это будет положительно сказываться на процессе разрушения слоя отложений.

Результаты проведенного анализа позволяют скорректировать рекомендации по рациональным диапазонам изменения параметра  $\nu$ , сделанным в работах [1, 3]. С учетом этих результатов при проектировании виброударных машин для очистки пластин толщиной от 6 до 12 мм можно рекомендовать принимать значение коэффициента  $\nu$  из диапазона 3–4, причем меньшие значения этого коэффициента соответствуют большей толщине пластины.

**Литература**

1. *Еремьянц В.Э., Ню В.В.* Влияние параметров ударной системы на напряженное состояние пластины при её виброударной очистке / В.Э. Еремьянц, В.В. Ню // Статья в настоящем номере журнала.
2. *Еремьянц В.Э.* Динамика ударных систем. Моделирование и методы расчета / В.Э. Еремьянц, Palmarium academic publishing. Саарбрукен. Германия, 2012. 586 с.
3. *Ню В.В.* К эффективности использования энергии удара при очистке пластин гидравлическими виброударными механизмами // Современные проблемы теории машин: матер. III межд. научн.-практич. конф. / В.В. Ню. Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2015. № 3. С. 168–173.