

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/м³; $a = 5100$ 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 σ_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 η_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	δ_1 , мм	ν				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
σ_u , 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
η_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
Θ	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 Θ . С увеличением ν от 2 до 4 параметр q возрастает в 5,23 раза, а параметр Θ – почти в 4 раза. Ростом этих параметров и объясняется снижение коэффициента передачи энергии удара бойка в пластину η_1 .

Следует отметить, что при наличии на внутренней поверхности пластины слоя отложений, приведенная толщина пластины возрастает, а приведенный коэффициент ν_c [1] уменьшается. При этом в начале процесса очистки пластины коэффициент η_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 ν , 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 ν 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.