

## **К вопросу создания эффективного цехового оборудования для взрывной обработки металлов с использованием железобетонных конструкций с вынесенным рабочим армированием**

*Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка*

Проведен анализ существующих проблем, сдерживающих широкое внедрение взрывной обработки давлением в цеховых условиях. Установлено, что наиболее эффективным будет взрывное оборудование с использованием железобетона в его конструкциях. Проведены исследования по определению длительной прочности бетона под действием импульсных однократных нагрузок, в результате чего установлено, что наиболее прочными являются образцы с вынесенным рабочим стальным армированием. Предложена конструкция железобетонной цеховой взрывной установки, позволяющая значительно снизить ее металлоемкость и стоимость.

**Ключевые слова:** взрывная обработка, цеховая бронекamera, железобетон, армирование, прочность, импульсное нагружение.

### **Введение**

Технологический процесс в таких областях, как авиационная, ракетно-космическая, машиностроение, радиоэлектроника, приборостроение и др. вызвал необходимость в создании технологий получения новых материалов и обработки различных деталей сложной конфигурации, повысил требования к точности и качеству получаемой поверхности. К таким технологиям относится штамповка взрывом, сварка (плакирование) взрывом для получения биметалла и триметалла, упрочнение взрывом, взрыво-термическая обработка, а также синтез материалов с помощью взрыва. В качестве взрывчатых веществ (ВВ) во взрывной штамповке применяются аммониты, тротил, детонирующие шнуры и другие бризантные ВВ. Применение этих энерго- и ресурсосберегающих наукоемких технологий для получения новых материалов, обработки и сборки, а также улучшения их свойств является важным фактором развития экономики страны, повышения уровня конкурентоспособности ее продукции и экономической безопасности государства.

### **1. Постановка проблемы и анализ последних исследований и публикаций**

Для широкого внедрения взрывных технологий на предприятиях необходимо создание и внедрение различного специального технологического оснащения, например, взрывной бассейн, бронекamera, вакуумная взрывная камера [1–6]. Анализ последних исследований показал, что наиболее эффективной в качестве цеховой установки является передвижная сварная стальная бронекamera (рис. 1), выполненная из листа толщиной более 15–20 мм.

Однако существующие конструкции имеют недостаток – значительная металлоемкость конструкции, а как следствие и значительная ее стоимость.

Указанный недостаток, по нашему мнению, можно устранить за счет создания передвижной бронекamеры, выполненной в виде железобетонной сборной конструкции.

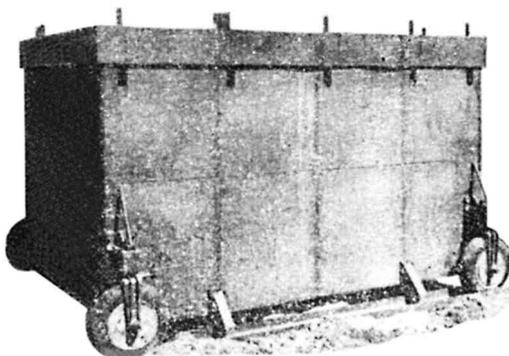


Рис. 1. Передвижная стальная взрывная бронекамера

До настоящего времени работы по испытанию бетона с вынесенным рабочим армированием на действие импульсных нагрузок больших энергий не публиковались. Известно лишь, что бетон под действием многократных нагружений подвергается усталости [7, 8].

**Целью** настоящей статьи является исследование длительной прочности бетона под действием многократных импульсных нагрузок и разработка конструкции цехового оборудования для взрывной листовой штамповки деталей больших габаритов.

## 2. Изложение основного материала

С целью исследования длительной прочности бетона под действием многократных импульсных нагрузок нами были проведены на базе взрывного полигона Кременчугского национального университета испытания цилиндрических бетонных образцов размером 8×8 см на маятниковом копре с использованием воды в качестве промежуточной среды. При таких испытаниях мы заранее условились понимать под длительной стойкостью бетона способность его сопротивляться 50 нагружениям. Если же учесть, что при каждом нагружении образец испытывает многократные нагрузки, связанные с пробегом прямой и отраженной волн уплотнения, то действительное число циклов нагружения каждого сечения образца будет значительно большим.

Образцы цилиндрической формы весом около 1 кг изготавливались из бетона марки М-500. Испытаниям подвергались образцы неармированные, армированные и с поверхностной консервацией.

Для сравнения образцы были разбиты на 4 серии: I серия – образцы неармированные; II серия – образцы, армированные продольной (Ø4 мм) и кольцевой (Ø0,8 мм) арматурами; III серия – образцы, армированные продольной (Ø1,8 мм) и кольцевой (Ø4 мм) арматурами; IV серия – бетонные армированные образцы с консервированными торцами (продольная арматура Ø4 мм и торцевые стальные диски толщиной 5 мм).

Образец помещался в головку маятникового копра, и в разовом (картонном) бассейне, заполненном водой, взрывался заряд. Удельный импульс  $j$ , кг·сек/см<sup>2</sup>, вычислялся по угловому отклонению маятника

$$j = (G_k \cdot \sin(\varphi/2))/0,78d^2, \quad (1)$$

где  $G_k = (T(G_0 + G_r)/\pi)$  – постоянная копра;

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g}} - \text{период колебания маятника};$$

$L$  – длина маятника;

$G_0, G_r$  – вес образца и головки копра;

$d$  – диаметр головки копра.

В качестве заряда применялся аммонит с теплосодержанием, приблизительно равным 1000 ккал/кг, и энергией  $E$ , равной  $4,27 \cdot 10^5$  Дж. Форма заряда сферическая. Иницирование заряда осуществлялось с помощью детонатора, эквивалентного 1,5 г аммонита. Указанные величины зарядов  $Q$  включают в себя и эквивалент детонатора. Варьируя величиной заряда  $Q$  и дистанцией взрыва  $R$ , мы изменяли величину падающего импульса и в зависимости от числа циклов нагружения данного образца до разрушения строили графики  $[j, M]$ , где  $N$  – число импульсов, которым подвергался данный образец.

В результате установлено, что характер разрушения образцов зависит от их конструкции. Если неармированные образцы разрушались в диаметральных сечениях, в общем, следуя нашим представлениям о механизме разрушения под действием ударных волн, то армированные образцы разрушались путем откола частиц преимущественно на переднем торце.

В связи с выявленным характером разрушения образцов возник трудный вопрос об установлении границ их предельного состояния. За предельное состояние неармированных образцов был принят их полный раскол в диаметральной плоскости, а армированных образцов – закольцевание отколов по кольцевому периметру переднего торца образца.

После многократных нагружений неармированных бетонных образцов (серия I) было установлено, что последние разрушаются в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения ударных волн на вполне определенном расстоянии от заднего торца образца. После развития плоскости раскола приблизительно на том же расстоянии возникает вторая плоскость раскола, смещенная по направлению к переднему торцу (рис. 2).

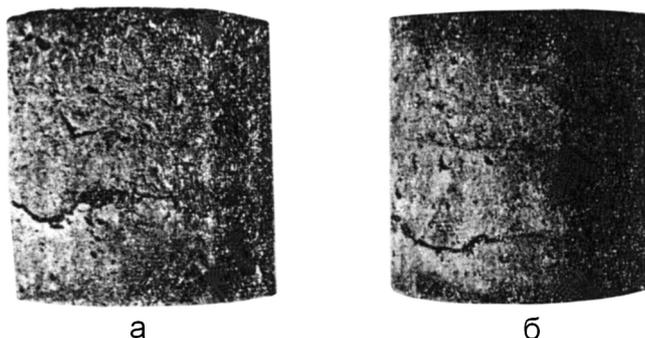


Рис. 2. Неармированные бетонные образцы после нагружений:  
а – неармированный бетонный образец с развитой первой трещиной;  
б – неармированный образец с первой и второй трещинами

Если за предельное состояние образца принять его раскол в диаметральной плоскости, то уравнение, характеризующее в первом приближении длительную прочность образца, имеет вид

$$jN^{0,7} = 0,029. \quad (2)$$

Если за предельное состояние образца принять закольцевание трещины по его периметру, то наибольший удельный импульс можно определить из уравнения

$$jN^{0,9} = 0,011. \quad (3)$$

Например, для числа импульсов  $N = 100$  раскол образца следует ожидать при величине импульса

$$j_{100} = 0,0011 \text{ кг·сек/см}^2,$$

а закольцевание трещины по периметру образца при

$$j_{100} = 0,000174 \text{ кг·сек/см}^2.$$

Как видим, импульс настолько мал, что можно считать неармированный бетон марки М-500 непригодным для использования в конструкциях, подверженных многократному действию жестких ударных волн.

Общая картина разрушения армированных бетонных образцов (серии II и III) имеет следующий характер. После нескольких нагружений на поверхности образцов появляются волосяные (рассматриваемые при увеличении) трещинки, локализованные преимущественно в зонах расположения арматуры, сначала на переднем торце, позже в средней части и, наконец, на заднем торце образца (рис. 3). Вначале волосяные трещины появляются в кольцевых направлениях, а позже и вдоль образующих. По мере увеличения числа нагружений эти трещины становятся видимыми и углубляются вплоть до откола поверхностных частиц бетона (рис. 3, б).

Откалывание частиц наблюдается прежде всего на переднем торце, несколько позже начинается откол в средней части образца в районе кольцевой арматуры (рис. 3, в).

Таким образом, армированные образцы разрушаются отколом частиц бетона преимущественно на переднем торце, обращенном к заряду. Частицы бетона откалываются по периметру образца и при большом числе нагружений на самом торце (рис. 3, в).

Во всех случаях было замечено, что трещины возникают прежде всего в районе кольцевой периферийной арматуры и весьма прогрессивно развиваются, поэтому следует признать в подобных конструкциях кольцевую арматуру нежелательной, предпочитая ей арматуру осевую и радиальную.

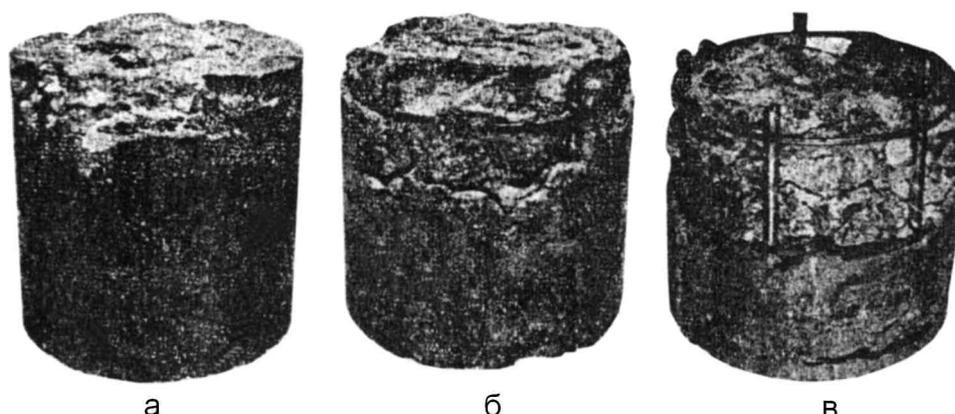


Рис. 3. Армированный бетонный образец в различных фазах разрушения

Образцы с усиленной продольной арматурой (серия II) показали большую долговечность по сравнению с образцами серии III. Существенного различия в характере разрушения образцов серии II и III не было замечено.

Армированные образцы показали значительно большую выносливость по отношению к импульсным нагрузкам, нежели образцы неармированные. Даже при весьма больших импульсах нам не удалось довести армированный образец до полного разрушения. Характер разрушения армированных и неармированных образцов также существенно отличается друг от друга. Если неармированные образцы раскалывались в диаметральных сечениях от действия отраженных волн растяжения, то в армированных образцах таких расколов мы не наблюдали, по-видимому, из-за наличия продольной арматуры. На торцах же, где материал бетона менее стеснен арматурой, действие пробегающих волн растяжения проявляется в отколе частиц материала, а также проникает и вглубь образца.

Судя по характеру разрушения армированных образцов, для повышения их долговечности желательно изменить схему арматуры, снабдив ее консервирующими элементами в виде торцевых дисков, к которым была бы приварена продольная арматура. Если принять за предельное состояние армированного образца откол бетона на торце, закольцевавшийся по его периметру, то наибольший импульс можно ориентировочно определить по уравнению

$$jN^{0,725} = 0,0525. \quad (4)$$

Например, при числе импульсов  $N = 100$  закольцевание откола по периметру образца следует ожидать при  $j = 0,00185$  кг·сек/см<sup>2</sup>, что в 10 раз больше, чем у неармированного образца.

Армированные образцы с вынесенным рабочим армированием торцов (серия IV). После некоторого числа нагружений на поверхности образца в зоне обоих торцов появляются волосяные трещины, видимые только при увеличении. По мере увеличения числа импульсов трещины развиваются до видимых. Общая ориентация трещин осевая с большей интенсивностью трещинообразования на переднем торце в зоне расположения продольной арматуры. Позже начинается откол частиц бетона: сначала обнажается продольная арматура, а затем размеры откалываемых частиц увеличиваются и разрушение проникает вглубь образца. Откол частиц у переднего торца больше, чем у заднего. При достаточно большом числе импульсов откол закольцовывается по периметру образца, и по всей поверхности без какой-либо закономерности появляются многочисленные хорошо развитые трещины. В этой фазе разрушение начинает развиваться раскол в диаметральной плоскости, аналогичный расколу неармированных образцов (рис. 4).

Образцы с консервированными торцами показали значительно большую выносливость по отношению к импульсным нагрузкам, чем образцы армированные, а тем более неармированные.

Причиной откола частиц бетона служат напряжения растяжения, вызванный пробегающими отраженными волнами напряжений, а поскольку продольная арматура в соединении с торцевой консервацией наилучшим образом стесняет деформации от действия волн растяжения, следует признать консервирование торцов неизбежным элементом конструкций, подверженных действию многократных импульсных нагрузок.

Судя по характеру разрушения образцов, можно еще больше повысить их долговечность путем частичной консервации и цилиндрической поверхности образца вблизи верхнего торца.

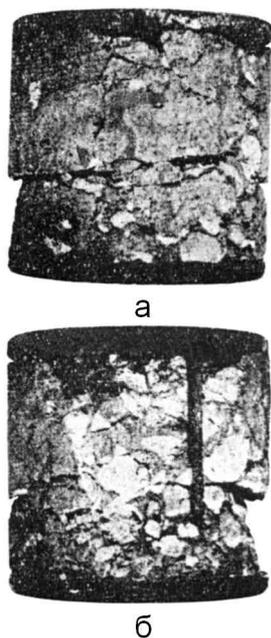


Рис. 4. Армированный бетонный образец с консервированными торцами в различных фазах разрушения

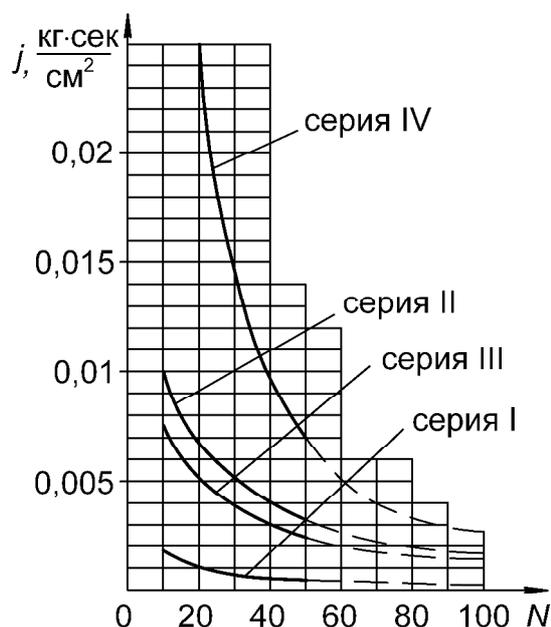


Рис. 5. Графики предельных удельных импульсов в зависимости от числа нагружений

Таким образом, если за предельное состояние принять откол частиц, закольцевавшихся по периметру образца, то наибольший импульс можно ориентировочно определить по уравнению

$$jN^{1,45} = 2. \quad (5)$$

На рис. 5 изображены графики  $[j, M]$ , которые дают представление о величинах предельных удельных импульсов по условию закольцевания трещин по периметру образцов с консервацией, армированных и неармированных. Пунктирная область графиков нами не исследовалась и построена предположительно.

В результате проведенных исследований установлено следующее:

1. В конструкциях, подверженных многократному действию импульсных нагрузок больших энергий, следует применять армированный бетон с арматурой периодического профиля, преимущественно закладываемого в направлении распространения ударных волн. Поверхности конструкций со стороны действия импульсов должны полностью консервироваться защитными стальными листами, приваренными к продольной арматуре, образуя с ней единое целое. Марка бетона должна быть не ниже М-300. Рекомендуется также консервировать и боковые грани конструкции вблизи рабочего торца.

2. Наиболее прочными конструкциями являются те, которые состоят из элементов с вынесенной арматурой на ее поверхность (конструкции с вынесенным армированием).

На рис. 6 представлена разработанная конструкция с передвижной железобетонной бронеканерой для взрывной обработки металлов давлением с исполь-

зованием бетонных конструкций с вынесенным рабочим армированием [9, 10] из листа.

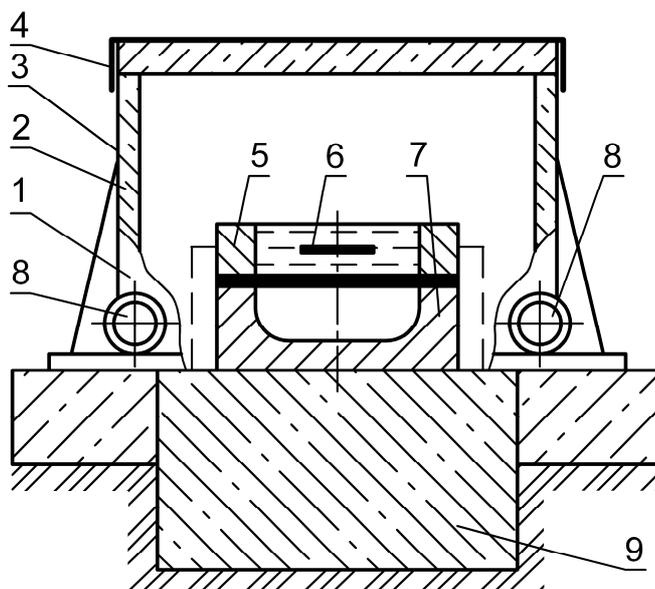


Рис. 6. Конструкция подвижной железобетонной бронекамеры с вынесенным рабочим армированием для штамповки взрывом:

- 1 – механизм передвижения; 2 – неподвижная стенка;  
3 – стальная обшивка камеры; 4 – подвижная крышка; 5 – прижимное кольцо;  
6 – заряд ВВ; 7 – матрица; 8 – колеса; 9 – фундамент

### Выводы

1. Проведенные исследования показали возможность использования железобетона с вынесенным стальным армированием толщиной 5 мм в конструкциях взрывных камер для обработки металлов давлением.

2. Взрывная железобетонная бронекamera по сравнению со стальной армированной тех же габаритов позволит значительно снизить металлоемкость и стоимость предлагаемой конструкции.

### Список литературы

1. Степанов, В. Г. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов [Текст] / В. Г. Степанов, И. А. Шавров. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1975. – 280 с. : ил.

2. Степанов, В. Г. Железобетонная оснастка для гидровзрывной штамповки [Текст] / В. Г. Степанов, В. П. Понкратов, В. Н. Кочеток // Технология судостроения. – 1968. – № 7. – С. 55–61.

3. Бажин, И. И. Опыт проектирования взрывных камер-установок цехового типа [Текст] / И. И. Бажин // Импульсная обработка металлов давлением. – Вып. 1. – Х., 1970. – С. 84–87.

4. Высокоскоростное малоотходное деформирование металлов в штампах [Текст] / ред. В. Г. Кононенко. – Х. : Вища школа, 1985. – 176 с. : ил.

5. Пихтовников, Р. В. Безбассейновая листовая штамповка взрывом [Текст] / Р. В. Пихтовников, Б. А. Хохлов. – Х. : Прапор, 1972. – 168 с. : ил.

6. Ударная листовая штамповка [Текст] : моногр. / В. Н. Чачин, Е. А. Фролов, Н. Д. Жолткевич, А. Ю. Журавский, А. Я. Мовшович. – М. : Информатика, 1991. – 224 с.

7. Селиванов, В. К. Железобетонные конструкции [Текст] / В. К. Селиванов. – М.–Л. : Госстройиздат, 1969. – 450 с.

8. Волков, А. И. Исследование взрывных камер в металлообработке и перспективы их применения [Текст] / А. И. Волков // Импульсная обработка металлов давлением : сб. науч. тр. «ХАИ». – Вып. 1. – Х., 1977. – С. 28–35.

9. Яковлев, Ю. В. Длительная прочность бетона под действием многократной импульсной нагрузки [Текст] / Ю. В. Яковлев // Импульсная обработка металлов давлением : сб. науч. тр. «ХАИ». – Вып. 2. – Х., 1979. – С. 16–21.

10. Муравьев, В. В. Проблемы та перспективи розвитку залізобетонних конструкцій з винесеним робочим армуванням [Текст] / В. В. Муравьев // Зб. наук. пр. Полтавського нац. техн. ун-ту ім. Ю. Кондратюка. Сер. Галузеве машинобудування, будівництво. – Вип. 33. – Полтава, – 2012. – С. 141–147.

Поступила в редакцию 11.11.2015

### **До питання створення ефективного цехового обладнання для обробки металів вибухом із використанням залізобетонних конструкцій з винесеним робочим армуванням**

Проведено аналіз існуючих проблем, що стримують широке впровадження вибухової обробки тиском у цехових умовах. Встановлено, що найбільш ефективним буде вибухове обладнання з використанням залізобетону в його конструкціях. Проведено дослідження з визначення тривалої міцності бетону під дією імпульсних однократних навантажень, у результаті чого встановлено, що найбільш міцними є зразки з винесеним робочим сталевим армуванням. Запропоновано конструкцію залізобетонної цехової вибухової установки, що дозволяє значно знизити її металоємність і вартість.

**Ключові слова:** обробка вибухом, цехова бронекера, залізобетон, армування, міцність, імпульсне навантаження.

### **To the Question of Creation of Effective Workshop Equipment for Explosive Equipment of Metals with the Use of Reinforce-concrete Constructions with the Taken Away Working Reinforcement**

The analysis of existing problems constraining widespread introduction of explosive equipment pressure in workshop conditions is conducted. It is established that the explosive equipment with the use of the reinforced concrete in its constructions will be the most effective. Researches on determination of long durability of concrete under the influence of pulse single loadings are conducted and it is established that the strongest are the samples with the taken-out working steel reinforcing. The construction of reinforce-concrete workshop explosive installation allowing considerably reduce in metal consumption and cut expenses is offered.

**Keywords:** explosive equipment, workshop armored chamber, reinforced concrete, reinforcement, durability, pulse loading.