Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. В. Калашников, В. Д. Суханов, Н. И. Лаптев, Д. А. Деморецкий, М. В. Ненашев, Деформационные процессы при обработке металлов взрывом. Методики расчета массы удлиненных зарядов взрывчатых веществ, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2001, выпуск 12, 109–113

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu69>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.81.55.215

26 апреля 2023 г., 07:11:50

Физика твердого тела

УДК 622.235

В.В. Калашиников, В.Д. Суханов, Н.И. Лаптев, Д.А. Деморецкий, М.В. Ненашев

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ ВЗРЫВОМ. МЕТОДИКИ РАСЧЕТА МАССЫ УДЛИНЕННЫХ ЗАРЯДОВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Предложены конструкции удлиненных зарядов взрывчатых веществ для разделения металлоконструкций и изготовления силовых элементов, служащих для упрочнения мест сварных соединений магистральных трубопроводов. Приведены методики расчета массы взрывчатого вещества, необходимого для совершения необходимой работы по деформированию и разрушению металлов. Показана высокая эффективность использования взрывных методов.

В ряде ситуаций возникает необходимость разделения элементов конструкций, технологических установок и т.п. в сжатый промежуток времени (авиационная и ракетная техника, устранение аварийных ситуаций и др.). Существующие взрывные средства разделения обладают высокой надежностью и малыми временами срабатывания, отличаются высокой устойчивостью к динамическим воздействиям, к перепадам температур в широком диапазоне, к космическому излучению, что выгодно отличает их от альтернативных устройств разделения. Элементная база взрывных устройств разделения базируется на отечественных комплектующих элементах и материалах, которые не являются дефицитными и дорогостоящими. Однако взрывные средства разделения имеют существенный недостаток, связанный с воздействием продуктов детонации взрывчатых (ВВ) и осколков на окружающие узлы и элементы объектов, что ограничивает область применения взрывных устройств разделения, вынуждает разработчиков объектов усложнять их конструкцию, что существенно повышает их стоимость.

Проведен ряд работ по созданию новой конструкции взрывных средств разделения, действие которых основано на использовании расширяющихся продуктов взрыва удлиненных зарядов ВВ (детонирующих шнуров).

Принцип действия предлагаемых средств разделения основывается на разрушении (срезании) наиболее “слабого” элемента разделяемой конструкции за счет энергии взрывчатого преращения удлиненного заряда ВВ.

Средство отделения представляет собой удлиненный заряд ВВ 4 (рис.1), размещенный в тонкостенной металлической оболочке 6, которая при срабатывании заряда деформируется, но не разрушается, и локализует действие продуктов взрыва. Крепление заряда внутри оболочки осуществляется при помощи прокладок 3, которые выполняют роль демпфера и передающей среды. Средство отделения размещается внутри камеры элемента конструкции 1, снабженной демпфирующими элементами 2 и прокладками 3, предназначенными для снижения ударных нагрузок на разделяемую конструкцию.

При взрыве удлиненного заряда расширяющиеся продукты детонации ВВ развивают усилие, которое передается через демпфирующие прокладки 3 и оболочку средства отделения 6 к вертикальным стенкам камеры элемента конструкции

Р и с. 1. Предлагаемая схема разделения:

1 – элемент конструкции; 2 – демпфирующие элементы; 3 – демпфирующие прокладки; 4 – удлиненный заряд ВВ; 5 – место расположения крепления; 6 – оболочка средства отделения

1. Развиваемое усилие затрачивается на срезание элементов крепления 5 и сообщение разделяемым элементам конструкции заданной начальной скорости.

Так как масса разделяемых элементов значительно превосходит массу ВВ, то при расчете скорости оболочки можно воспользоваться гипотезой мгновенной детонации, поскольку отражение волн произойдет многократно до момента разделения [1].

На основе закона сохранения энергии можно записать [1]:

$$m_{\text{ВВ}}Q = E_{\text{к}} + E_{\text{эк}} + E_{\text{р}} + E_{\text{п}}, \quad (1)$$

где $m_{\text{ВВ}}$ - масса ВВ; Q - теплота взрывчатого разложения ВВ; $E_{\text{к}}$ - кинетическая энергия продуктов детонации; $E_{\text{эк}}$ - кинетическая энергия разделяемых элементов конструкции; $E_{\text{р}}$ - энергия, затрачиваемая на разделение элементов конструкции и пластическое деформирование оболочки средства отделения; $E_{\text{п}}$ - внутренняя потенциальная энергия продуктов детонации.

Кинетическая энергия продуктов детонации определяется из соотношения [2]:

$$E_{\text{к}} = \frac{m_{\text{ВВ}}u^2}{2n+2}, \quad (2)$$

После детонации заряда расширяющимися продуктами детонации будут вовлечены в движение разделяемые створки. Очевидно, что кинетическая энергия элементов конструкции будет равна:

$$E_{\text{эк}} = \frac{m_{\text{эк}}u^2}{2}. \quad (3)$$

Энергия $E_{\text{р}}$ определяется как:

$$E_{\text{р}} = A_{\text{д}} + E_{\text{ф}}, \quad (4)$$

где $A_{\text{д}}$ - динамическое значение работы для разрыва элементов конструкции; $E_{\text{ф}}$ - энергия, затрачиваемая на пластическое деформирование оболочки средства разделения.

Динамическое значение работы для разрыва разделяемых элементов определяется выражением [1]:

$$A_{\text{д}} = A_{\text{с}}k_{\text{д}}, \quad (5)$$

где $A_{\text{с}}$ - значение работы для разрыва в статических условиях, $k_{\text{д}}$ - коэффициент динамичности, равный отношению динамической и статической работ разрушения.

Внутреннюю потенциальную энергию продуктов детонации можно определить из формулы [2]:

$$E_{\text{п}} = \frac{p}{\rho(k-1)} m_{\text{ВВ}}. \quad (6)$$

Соответствующие моменту получения створками максимальной скорости давление p и плотность ρ при взрыве цилиндрического заряда могут быть определены следующим образом [1]:

$$p_{\text{ср}}/p = (R/R_0)^{2k} = (\rho_0/\rho)^k, \quad (7)$$

где $p_{\text{ср}} = \rho_0 D^2/8$ - среднее давление при мгновенной детонации; D - скорость детонации ВВ, ρ_0 - начальная плотность ВВ; R_0 радиус заряда ВВ; R - радиус продуктов детонации, соответствующий моменту получения створками максимальной скорости; k - показатель изоэнтропы.

Из (7) следует, что

$$p = \frac{p_{\text{ср}}}{\left(\frac{R}{R_0}\right)^{2k}} = \frac{\rho_0 D^2}{8 \left(\frac{R}{R_0}\right)^{2k}} = \frac{\rho_0 D^2}{8 \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^k}. \quad (8)$$

При подстановке (8) в (6) получаем

$$E_{\text{п}} = \frac{\rho_0 D^2 m_{\text{ВВ}}}{8 \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^k \rho(k-1)}. \quad (9)$$

Подставляя выражения (2, 3, 5, 9) в формулу (1), получим

$$m_{\text{ВВ}}Q = \frac{m_{\text{ВВ}}u^2}{2n+2} + \frac{m_{\text{эк}}u^2}{2} + A_{\text{с}}k_{\text{д}} + \frac{\rho_0 D^2 m_{\text{ВВ}}}{8 \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^k \rho(k-1)}, \quad (10)$$

откуда масса заряда ВВ, необходимая для разделения элементов конструкции, определяется

следующим образом:

$$m_{\text{ВВ}} = \frac{A_c k_d + 0,5 m_{\text{эк}} u^2}{Q_{\text{ВВ}} - \frac{u^2}{2n+2} - \frac{\rho_0 D^2}{8(\rho_0/\rho)^k \rho(k-1)}}. \quad (11)$$

Ориентировочные значения массы удлиненного заряда ВВ, необходимого для разделения конструкции массой 100 кг, приведены в таблице.

Энергетические характеристики средств отделения на основе удлиненного заряда

Скорость отделения, м/с	Усилие, требуемое для разделения 1 м конструкции, кН	Линейная плотность удлиненного заряда, г/м
3	60	8,2
3	80	9,3
4	60	12,0
4	80	13,2

Предлагаемые средства разделения, в отличие от существующих, при срабатывании не оказывают негативного влияния на окружающие узлы и элементы объектов образующимися продуктами взрыва, локализуемыми внутри неразрушающейся оболочки средства разделения, что исключает необходимость в использовании специальных защитных устройств.

К этому же классу относятся детонирующие удлиненные заряды (ДУЗ) для штамповки усиливающей оснастки поперечных сварных швов трубопроводов. И поскольку в настоящее время существует серьезная проблема по предотвращению аварий на магистральных нефтепроводах, основная масса которых происходит из-за недостаточной прочности поперечного сварного шва, разработка и изучение таких конструкций становится очень актуальной. Предлагаемый метод контактной взрывной штамповки усиливающих элементов ДУЗами специальной конструкции обладает неоспоримыми преимуществами перед традиционными: 1) высокая производительность; 2) неограниченность в геометрических размерах заготовки; 3) мобильность процесса; 4) высокое качество получаемых изделий; 5) невысокая стоимость. Однако при решении вопросов, связанных с контактной взрывной штамповкой, приходится сталкиваться с рядом сложностей по определению работы формообразования.

На сегодняшний день строгого решения задачи деформирования заготовки в большинстве случаев получить не удастся, особенно если это касается процессов контактной взрывной штамповки удлиненными детонирующими зарядами без применения матрицы.

Количественный анализ влияния волновых процессов на напряженно-деформированное состояние чрезвычайно сложен и только при некоторых допущениях позволяет определить скорости продольных (c_1) и поперечных (c_2) волн, распространяющихся по плоской круглой заготовке и соотношение которых является основным в определении характера деформации.

Так, при хорошо выраженной площадке текучести на диаграмме напряжение-деформация $\sigma(\epsilon_i)$ величина c_1 становится меньше скорости распространения поперечных волн c_2 , причем происходит наибольшая локализация деформаций, что в свою очередь приводит к разрушению заготовки.

В этом плане использование метода расчета и сравнения скоростей c_1 , c_2 является достаточно сложным для определения критических условий разрушения штампуемой заготовки. В то же время известная зависимость максимального давления на поверхности металла (p_{pm}) от скорости распространения упругих волн

$$p_{\text{pm}} = 2 p_x \rho_m c_l / (\rho_m c_l + r_x D), \quad (12)$$

где p_x - давление детонации, Па; ρ_m - начальная плотность металла, г/см³; ρ_x - начальная плотность ВВ, г/см³; D - скорость детонации, м/с; c_l - скорость распространения упругих волн, м/с, позволяет сделать вывод о том, что именно критическая величина динамического давления, при которой происходит разрушение, может служить критерием оценки вязкопластического состояния металла.

На этом основании теоретически описан и экспериментально подтвержден метод исследования вязкопластического состояния металла при контактном импульсном нагружении в системе металл-ВВ удлиненными детонирующими зарядами посредством нахождения критической величины динамического давления ($p_{\text{л.кр}}$), при котором происходит разрушение заготовок с различной толщиной стенки:

$$p_{д.кр} = 0,725\delta_{ст}, \quad (13)$$

где $p_{д.кр}$ - критическая величина динамического давления, при которой заготовка разрушается, ГПа; $\delta_{ст}$ - толщина стенки заготовки из стали 17ГС, мм.

Таким образом, для оценки критических условий разрушения заготовок различной толщины из низколегированной стали 17ГС, наиболее широко используемой при изготовлении усиливающей оснастки на нефтепроводах, достаточно измерить величину давления на фронте ударной волны после подрыва заряда ВВ и внести ее в выражение (2).

Экспериментальный анализ адекватности существующих методик по расчету массы заряда ВВ для дистанционной взрывной штамповки (через промежуточную среду) показал их непригодность при ведении контактных операций (непосредственный контакт). Так, массы зарядов ВВ завышены, что приводит к появлению дефектов на заготовках. Это объясняется различным характером ударно-волнового нагружения дистанционной и контактной взрывной штамповки. Кроме того, высокоскоростное ударное воздействие усугубляется отсутствием матрицы, которая могла бы воспринять избыточную энергию взрыва. Поэтому была создана методика для расчета основных характеристик и параметров процесса контактной взрывной штамповки детонирующими удлиненными зарядами (ДУЗ).

Особый интерес вызывает нахождение конкретных аналитических выражений для определения характеристик удлиненных зарядов в связи с параметрами процесса контактной взрывной штамповки. Это связано с необходимостью изготовления высокоэффективного усиливающего элемента поперечных сварных швов трубопроводов, который позволяет увеличить прочность сварного шва до прочности основной трубы. Данная конструкция состоит из отрезка трубы того же диаметра, что и обслуживаемый трубопровод, разделенный в осевом направлении на два полукольца, которые накладываются на сварное соединение таким образом, чтобы сварной шов находился по центру технологической канавки усиливающей муфты. После этого муфта приваривается к трубопроводу. Технологическая канавка изготавливается при помощи детонирующего удлиненного заряда для штамповки.

Анализ экспериментальных и теоретических данных позволил предположить, что процесс развивается по линейному закону и определяется функцией вида $y = kx$, которая дает возможность прогнозировать параметр максимального прогиба заготовке $h_{\max}$. Имеющиеся экспериментальные данные использовались при выведении аналитического выражения, аппроксимирующего величину $h_{\max}$:

$$h_{\max} = \frac{m_{лВВ}\rho_{ВВ}}{\delta_{ст}d_{кр}\delta_{д}^{0,1}}k, \quad (14)$$

где $m_{лВВ}$ - линейная масса заряда, кг/м; $\rho_{ВВ}$ - плотность ВВ, г/см³; $\delta_{д}$ - толщина демпфера, мм; $\delta_{ст}$ - толщина стенки заготовки, мм; $d_{кр}$ - критический диаметр ВВ, мм; k - эмпирический коэффициент пропорциональности ($k = 4060$).

Р и с. 2. Конструкция ДУЗ для штамповки усиливающих цилиндрических муфт:

1 - ДШУ; 2 - оболочка заряда; 3 - ВВ; 4 - слой клея; 5 - демпферная прокладка; 6 - полиэтиленовые крышки; Б - калибр ДУЗ.

Экспериментальные данные по определению $h_{\max}$ с применением зарядов аммонита 6ЖВ расчетной массы показывают хорошую сходимость с расчетными данными (до 5%).

Применение формулы (14) для расчета массы заряда при контактной штамповке является целесообразным и позволяет рассчитывать данную величину с достаточной точностью только для ВВ с низкой скоростью детонации (до 4 км/с).

Использование выражения (14) позволило создать конструкцию ДУЗ для штамповки цилиндрических усиливающих муфт (рис. 2), которая уже применяется в службах предупреждения и ликвидации аварий на магистральных нефтепроводах и защищена патентом РФ RU 2111074 C1 от 20.05.98.

Анализ профилей технологической канавки, полученной при помощи ДУЗ для штамповки, показал, что они имеют более плавную линию без перегибов в отличие от традиционно вальцованной, где перегибы выражены в местах воздействия бочек валков. Свойства металла после различных методов деформации оценивались по характеру изменения твердости металла по сечению технологической канавки. Обнаружено, что твердость металла вальцованной галтели монотонно возрастает от НВ 163 МПа основного недеформированного металла до 187 МПа. При этом в центре галтели наблюдается резкое понижение уровня твердости до НВ 177 МПа. Это область непосредственного воздействия на металл бочки вала. Уровень твердости металла, изготовленного методом штамповки взрывом, выше уровня твердости металла вальцованной галтели и составляет НВ 207 МПа, что связано со спецификой нагружения заготовки.

Металлографический анализ не обнаружил трещин, микротрещин и нарушений сплошности металла, но метод взрывной штамповки сказался на дисперсности структуры и на субмикроструктуре. Более дисперсная структура металла галтели, полученной энергией взрыва (балл зерна 11-12), свидетельствует о более высоких показателях по сравнению с вальцованным образцом (балл зерна 8-9), характеризующих прочностные и усталостные свойства усиливающей цилиндрической муфты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Физика взрыва / Баум Ф.А., Орленко Л.П. и др. Под ред. К.П.Станюковича. М.: Наука, 1975. 704с.
2. Баум Ф.А., Державец А.С., Санасарян Н.С., и др Термостойкие взрывчатые вещества и их действие в глубоких скважинах. М.: Недра, 1969. 160 с.
3. Штамповка взрывом. Основы теории. /Под ред. М.А. Анучина. М.: Машиностроение, 1972. 149 с.
4. Райнхард Дж. С., Пирсон Дж. Взрывная обработка металлов. М.: Мир, 1966. 390 с.
5. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука , 1972. 188 с