

А. С. Горбцов, Т. Ш. Сильченко, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, С. В. Хаустов

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕТАЕМОЙ ПЛАСТИНЫ С ИМПУЛЬСНОЙ НАГРУЗКОЙ В УСЛОВИЯХ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ ВЗРЫВОМ

Волгоградский государственный технический университет

При плакировании взрывом крупногабаритных пластин отмечается изменение свойств соединения по длине свариваемых заготовок, обнаруживающееся в увеличении размеров волн и количества оплавленного металла [1 ... 7], что в ряде случаев приводит к существенному снижению прочностных свойств биметалла.

Одной из наиболее вероятных причин проявления указанного выше эффекта в зоне соединения длинномерных пластин при сварке взрывом является возможное вертикальное перемещение сечений метаемой пластины, расположенных впереди точки контакта под еще непродетонировавшим зарядом ВВ, которое может происходить за счет давления ударно-сжатого воздуха, находящегося между свариваемыми пластинами [1], или действия инерционных сил ударно-волнового происхождения [8], вследствие чего нарушается геометрия соударения свариваемых элементов. Обе гипотезы имеют право на существование, каждое из рассмотренных явлений, безусловно, вносит свой вклад в нарушение геометрии соударения, однако до настоящего времени остается открытым вопрос о том, какая из указанных причин будет превалировать при тех или иных условиях сварки взрывом.

Оставив пока без внимания вопрос влияния на изменение зазора между пластинами ударно сжатого воздуха, находящегося перед точкой контакта, попытаемся оценить и математически описать поведение изолированной металлической пластины при воздействии на нее скользящей детонационной волны.

Если предположить, что фронт детонационной волны имеет прямолинейную форму, перпендикулярную продольной оси пластины, то при таком допущении пластину можно рассматривать как горизонтальную балку, на которую действует вертикальная бегущая импульсная нагрузка.

Математическая модель балки (рис. 1) построена в виде набора сегментов с тремя степенями свободы – двумя поступательными и одной поворотной, связанными упруго-демпфирующими элементами. Построение дискретной модели проводилось с помощью программного комплекса расчета динамики систем тел ФРУНД [9].

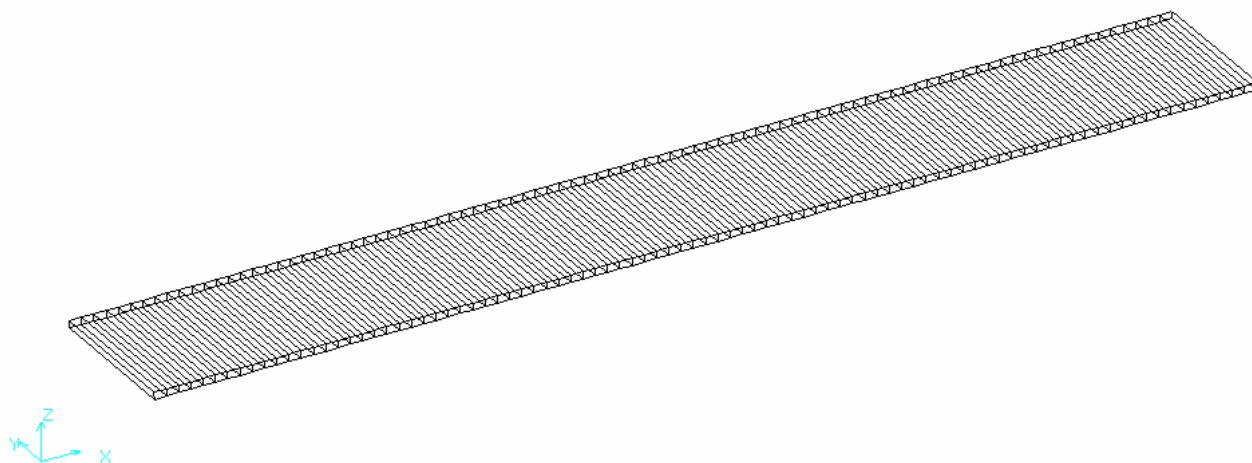


Рис. 1. Расчетная схема пластины

Использование методов моделирования динамики систем многих тел рационально тем, что позволяет достаточно просто учитывать физическую и геометрическую нелинейности задачи. В линейном случае – линейные упруго-демпфирующие элементы и малые угловые повороты сегментов, такая модель соответствует конечно-элементной модели балки с тремя степенями свободы в узле. Матрица жесткости одного элемента такой модели имеет вид:

$$\begin{pmatrix} K & -K \\ -K & K \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$K = \begin{pmatrix} \frac{EF}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6EJ}{l^3} & -\frac{4EJ}{l^2} \\ 0 & -\frac{4EJ}{l^2} & \frac{EJ}{l} \end{pmatrix},$$

где E – модуль упругости; J – геометрический момент инерции поперечного сечения; F – площадь поперечного сечения балки; l – длина сегмента балки.

Матрица инерции элемента записывается как

$$\begin{pmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{pmatrix};$$

$$M = \begin{pmatrix} \rho l & 0 & 0 \\ 0 & \rho l & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\rho l^3}{12} \end{pmatrix} \quad (2)$$

где ρ – плотность единицы длины балки.

В линейном случае матрица демпфирования пропорциональна матрице жесткости

$$C = \mu \begin{pmatrix} K & -K \\ -K & K \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где μ – некоторый коэффициент пропорциональности.

Таким образом, полная дискретная модель балки под действием импульсной нагрузки в линейном случае описывается уравнением:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f(x, t) \quad (4)$$

где M , C , K – соответственно матрицы масс, демпфирования и жесткости всего ансамбля; $f(x, t)$ – вектор импульсных нагрузок.

Для моделирования колебаний рассматривалась стальная балка со следующими параметрами: длина 0,9 м; ширина 0,12 м; толщина 6 мм. Модуль упругости принимался равным $2,05 \cdot 10^{11}$ Н/м²; плотность материала балки 7100 кг/м³. Балка разбивалась на 90 сегментов.

Для оценки точности дискретной модели (4) было проведено сравнение собственных частот колебаний свободной балки, полученных из численной модели и из аналитического решения уравнения колебаний балки

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + a^2 \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = 0, \quad (5)$$

где $a^2 = \frac{EJ}{\rho}$.

Для свободных граничных условий собственные частоты, соответствующие упругим формам колебаний, определяются по формуле

$$\omega_n = \frac{\mu_n a}{l}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (6)$$

где μ_n – корни уравнения

$$\operatorname{ch}(y) \cos(y) - 1 = 0 \quad (7)$$

Сравнительный анализ показал, что теоретические и расчетные собственные значения до частоты 14 кГц, отличаются не более чем на 3,5%.

На первом этапе исследования анализировался характер прохождения волн от точечной вертикальной импульсной нагрузки, приложенной в левом конце балки. Длительность импульса составляла 0,0001с, величина силы варьировалась в пределах $10^4 \dots 10^6$ Н, форма импульса принималась пря-

моугольной. Временные реализации координат получались с помощью численного интегрирования системы (4).

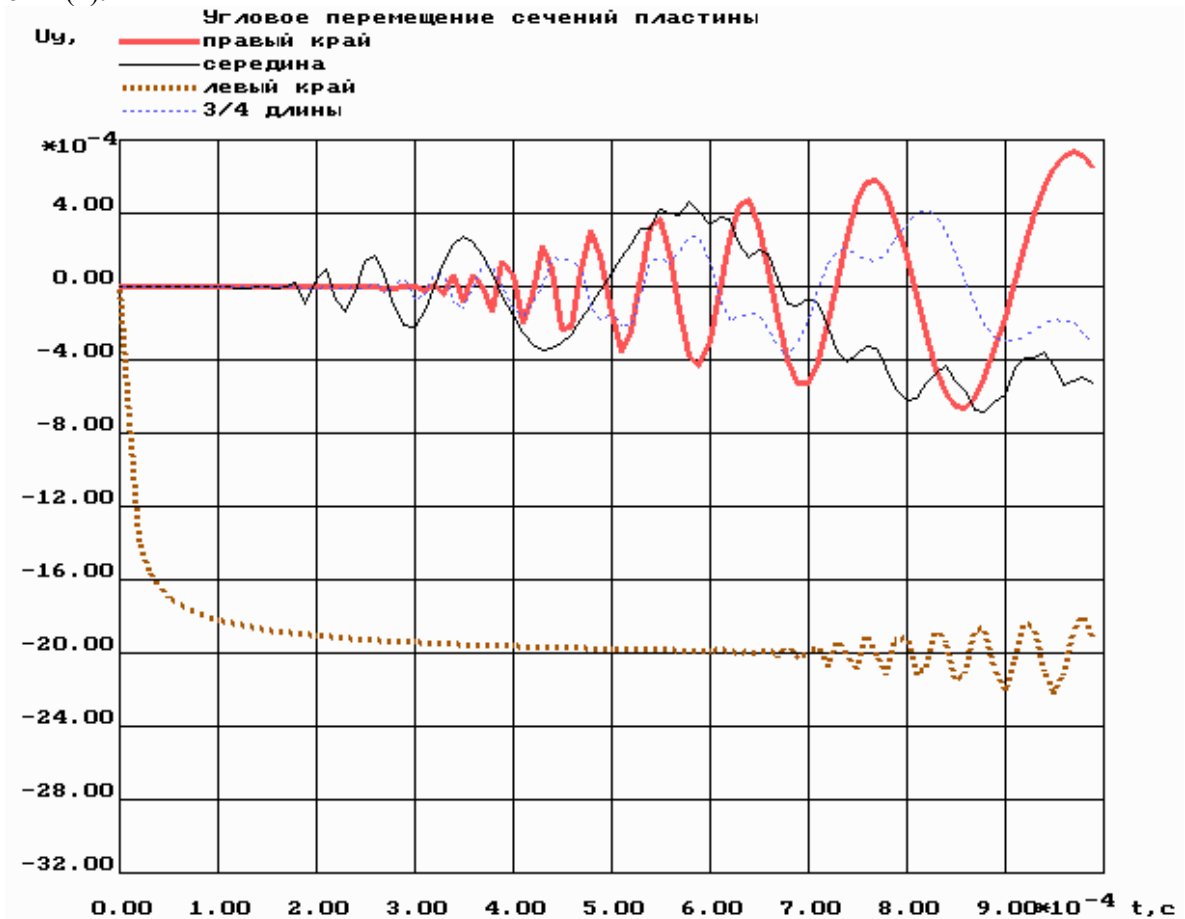


Рис. 2. Угловые перемещения сечений пластины под действием импульса

На рис. 2. показаны графики вертикальных и угловых перемещений правого конца пластины при действии импульса силы величиной 10^4 Н.

Как следует из графиков рис. 2, сечения пластины после прохождения через них продольной волны сжатия начинают совершать угловые колебания с возрастающей амплитудой и уменьшающейся частотой. Теоретическое время достижения волной сжатия правого конца пластины составляет 0,0017с. Время начала значимых угловых колебаний для правого конца пластины составляет 0,0025с. Частоты угловых колебаний в разных сечениях различны: низшая частота наблюдается посередине, высшая – в правом конце.

Следует отметить, что частоты колебаний сильно уменьшаются с течением времени. В левом конце пластины, к которому приложена импульсная нагрузка, колебания возникают с большой задержкой и характеризуются меньшей интенсивностью нарастания.

При большей величине пика силы качественные характеристики колебаний не изменялись, увеличивались только амплитуды. На рис. 3 показаны графики вертикальных перемещений в различных точках пластины при величине импульса силы 10^6 Н.

Как видно из рисунка импульс вызывает значительные вертикальные смещения точек пластины, максимальные значения которых имеют место на краях. Колебания крайних точек и сохраняются дольше всего.

На рис. 4 показана форма пластины соответствующая моменту 0,003 с, в данный момент времени присутствуют большие вертикальные смещения правого конца пластины. Увеличение толщины пластины увеличивает интенсивность нарастания амплитуды в начальный момент времени, но частота колебаний падает быстрее, по сравнению с тонкой пластиной (рис. 5). Этот различие наблюдается и на форме пластины (рис. 4, 6).

Увеличение длины пластины в два раза при неизменной толщине замедляет рост колебаний в несколько раз, при этом так же увеличивается время до возникновения колебаний (рис. 7).

Для анализа влияния сил диссипации проведены расчеты с моделью сил неупругого сопротивления в виде линейного вязкого сопротивления. Вязкое сопротивление описывается матрицей пропорциональной матрице жесткости. Коэффициент пропорциональности выбирался таким, чтобы обеспечить заданное относительное демпфирование на выбранной частоте

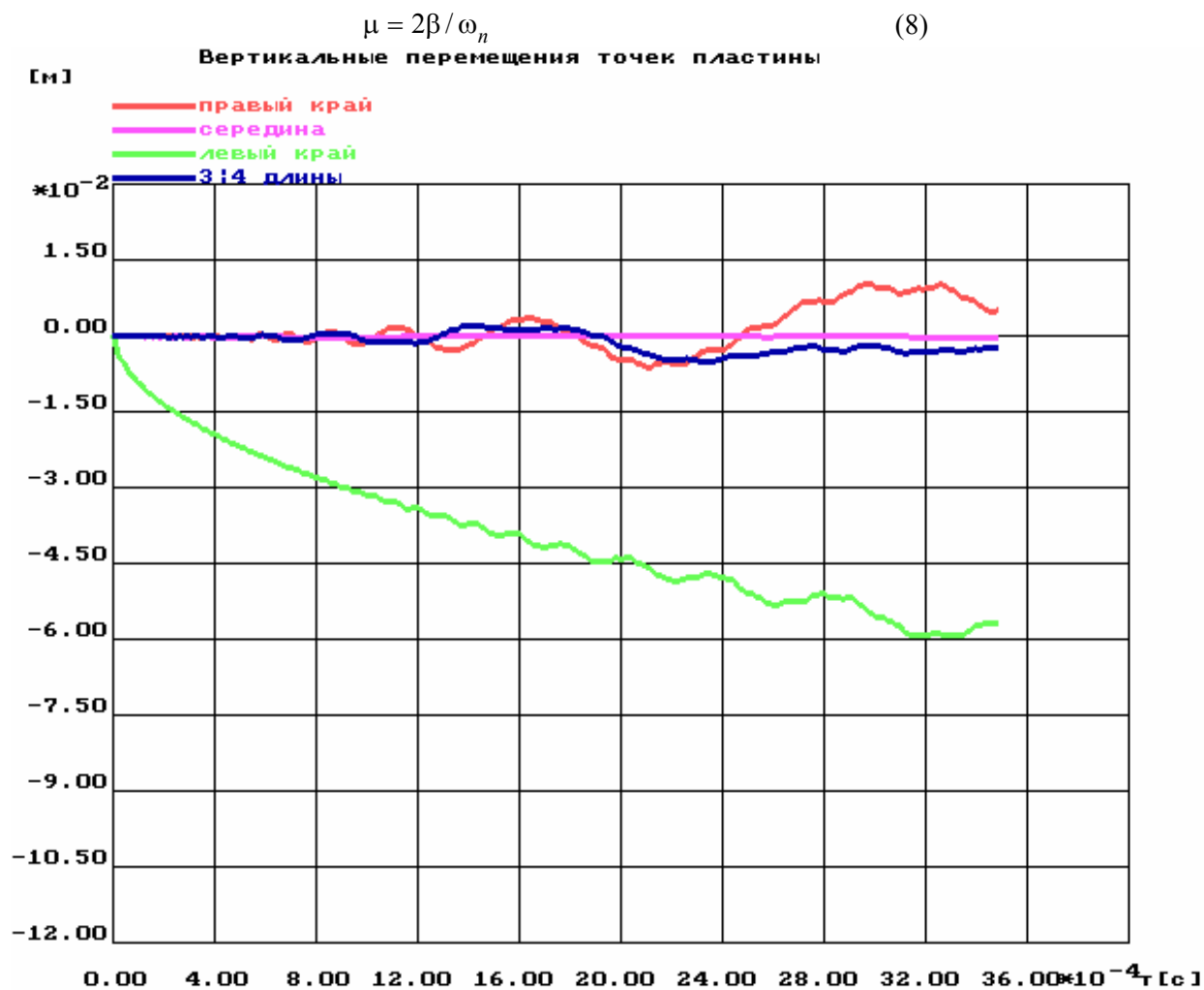


Рис. 3. Вертикальные перемещения точек пластины под действием импульса

Как следует из рис. 3, 4 частоты колебаний пластины от импульсного возмущения лежат в диапазоне 1...5 кГц. Возникновение колебаний происходит на еще большей частоте (см. рис. 3, 4). Были рассчитаны колебания пластины для $\beta = 0,02$ и $\omega_n = 5$ (рис. 8).

Как следует из графика, на частоте 5 кГц демпфирование снижает уровень колебаний примерно в 2 раза. Однако следует отметить, что принятый коэффициент μ завышает демпфирование на частотах больших 5 кГц, и занижает на меньших частотах. Поэтому можно предположить, что нарастание колебаний до момента времени 0,001 с будет более значительным, и в целом уменьшение амплитуды будет меньше, чем показано на рис. 8 в момент времени 0,0006 с. По этим же причинам уровни коле-

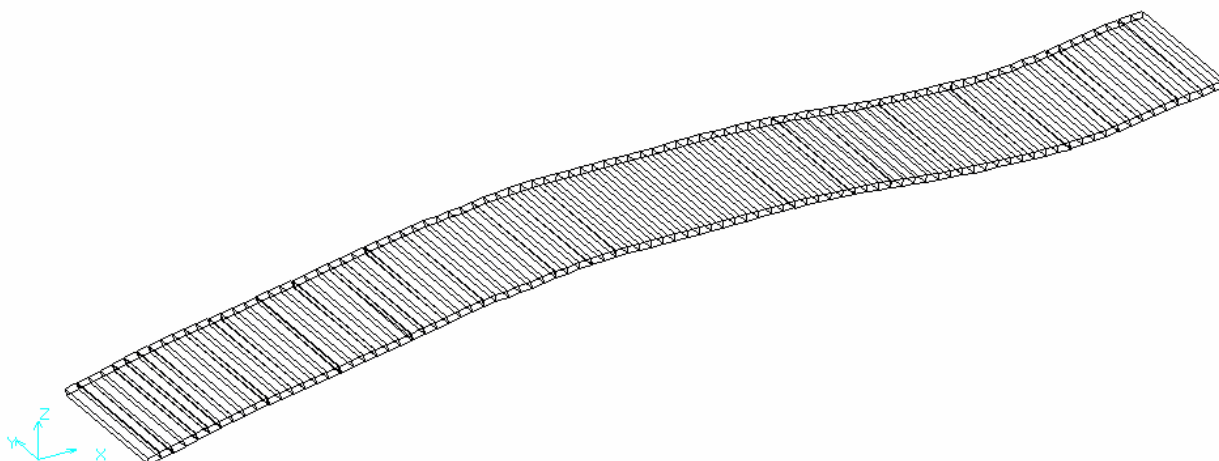


Рис. 4. Форма пластины при действии импульса на левый край, $t=0,003$ с

баний после момента времени 0,001с будут несколько ниже. Следует отметить так же, что демпфирование задерживает момент возбуждения колебаний примерно на 0,00045 с (см. рис. 8).

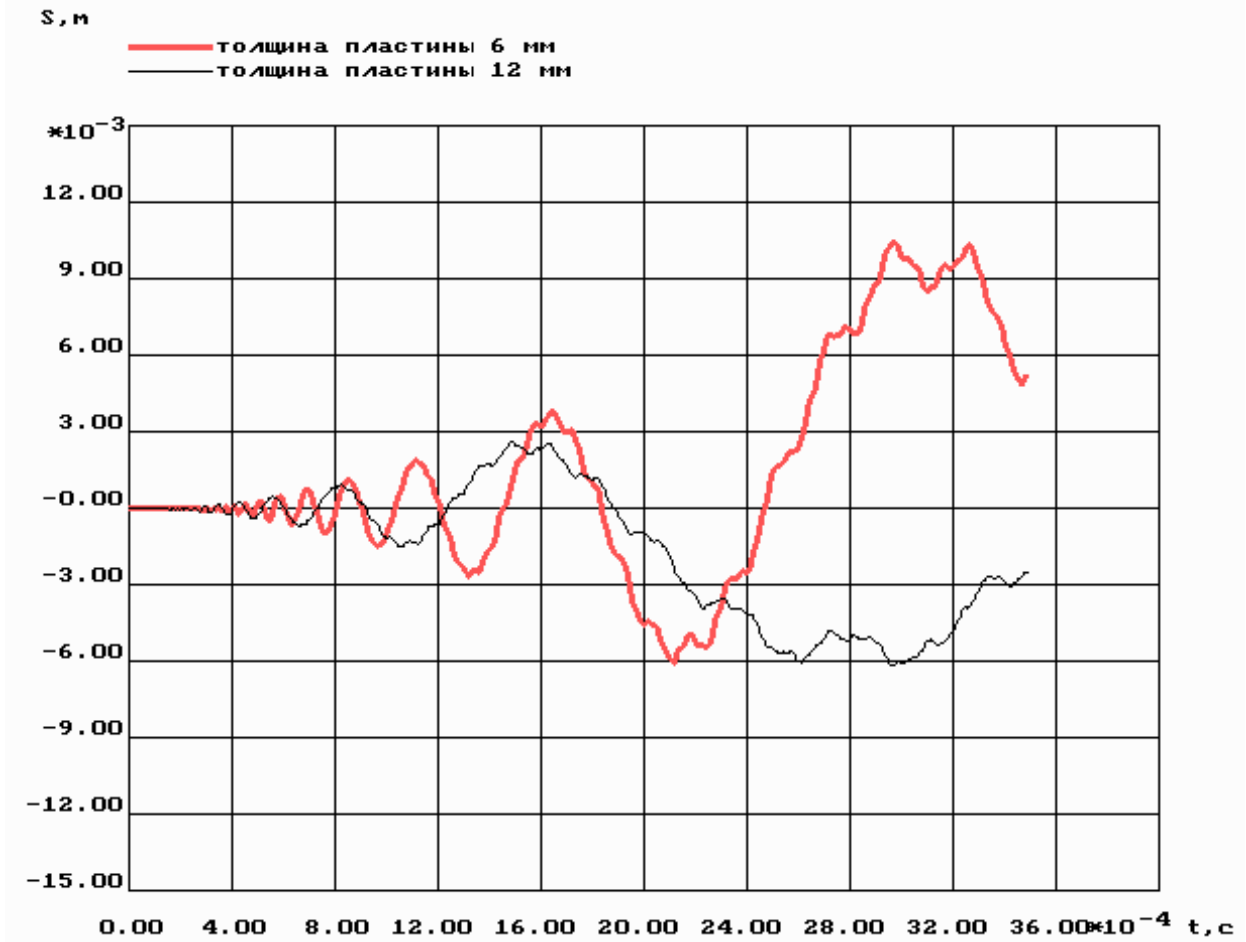


Рис. 5. Вертикальные перемещения правого края пластины при различных ее толщинах

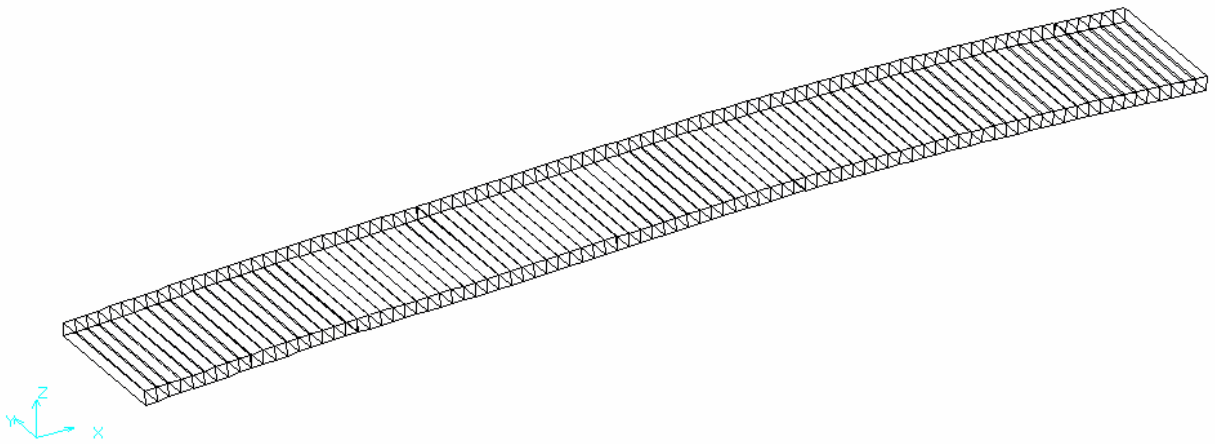


Рис. 6. Форма пластины при действии импульса на левый край, $t=0,003\text{с}$

Анализ колебаний пластины под действие точечной импульсной силы показал, что такое воздействие может возбуждать вертикальные и угловые вибрации пластины переменной частоты и нарастающей амплитуды. Рост таких колебаний начинается после достижения волной сжатия противоположного от точки нагрузки края пластины. Вязкое сопротивление в пластине задерживает момент начала колебаний и несколько снижает их амплитуду.

На следующем этапе исследования изучалось возбуждение колебаний пластины бегущей импульсной нагрузкой, имитировавшей давление детонационного фронта взрывной волны. Скорость фронта волны составляла 2154 м/с, давление вычислялось по экспоненциальной зависимости, общепринятой в теории сварки взрывом [7]. Относительное демпфирование в расчетах принималось равным 0,02 на частоте 5 кГц.

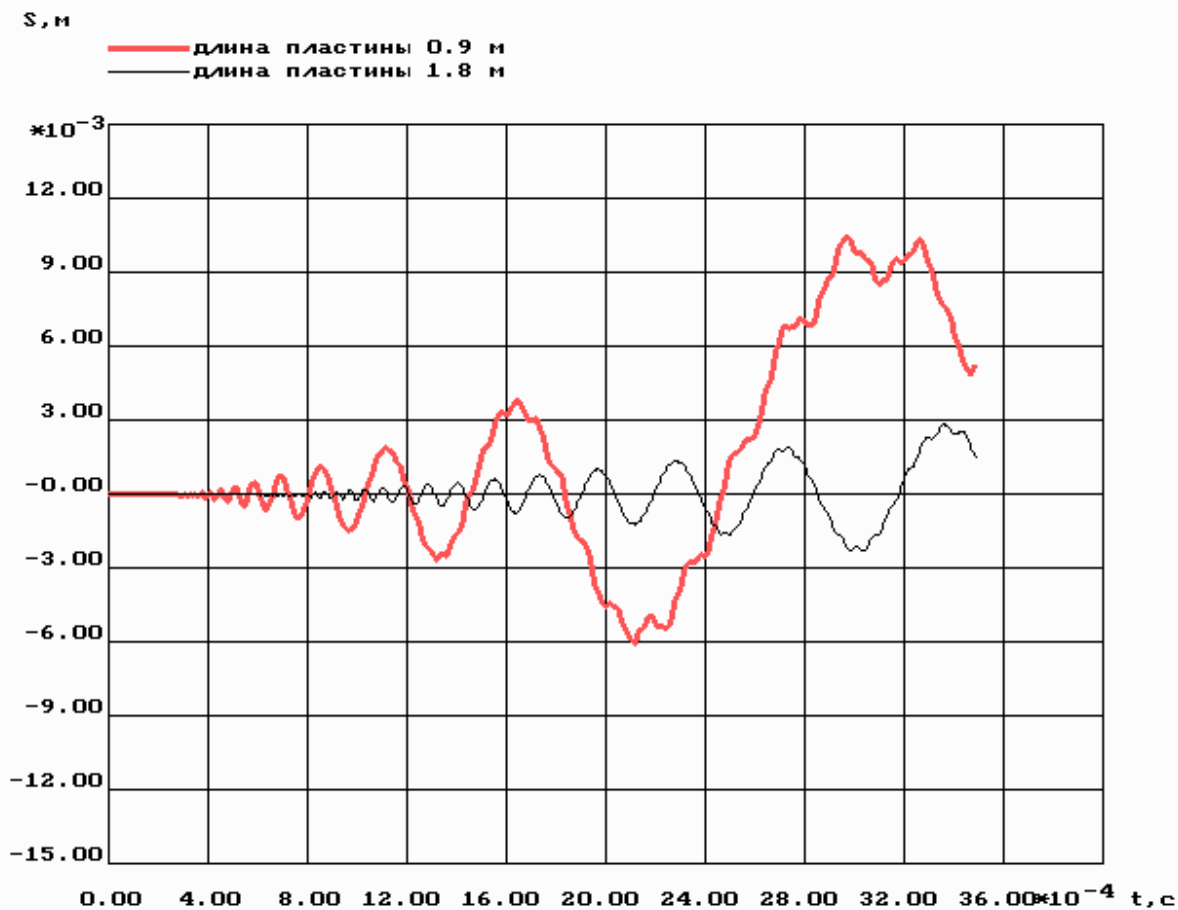


Рис. 7. Вертикальные перемещения правого края пластины при изменении ее длины

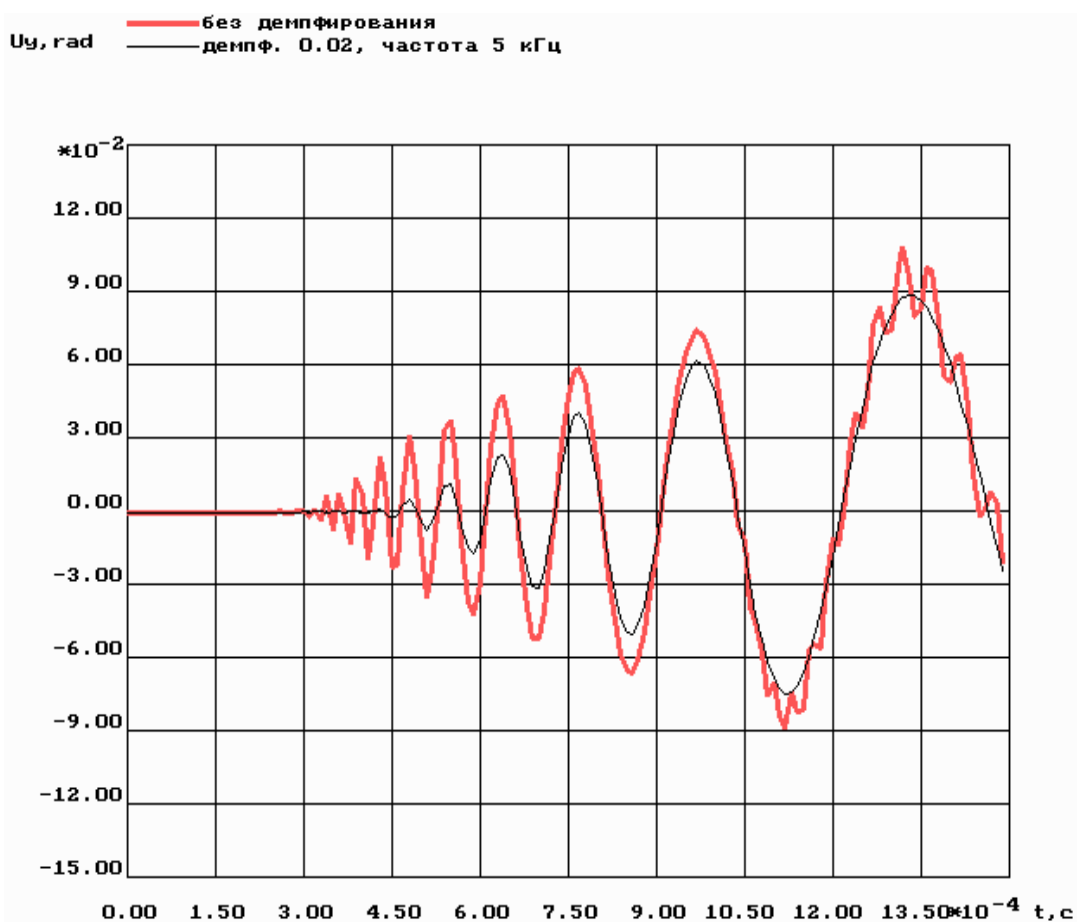


Рис. 8. Угловые перемещения правого края в зависимости от вязкого сопротивления

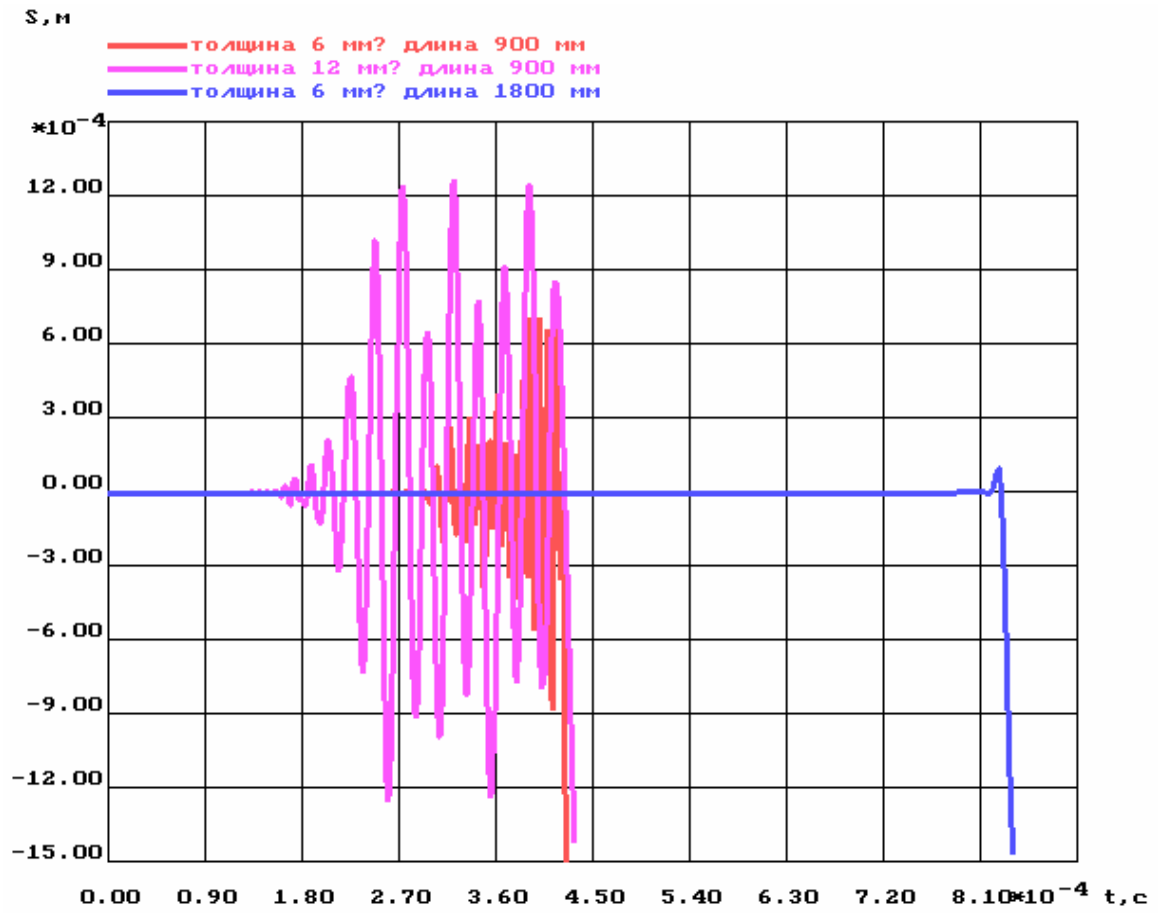


Рис. 9. Вертикальное смещение правого края пластины (бегущая импульсная нагрузка, без демпфирования)

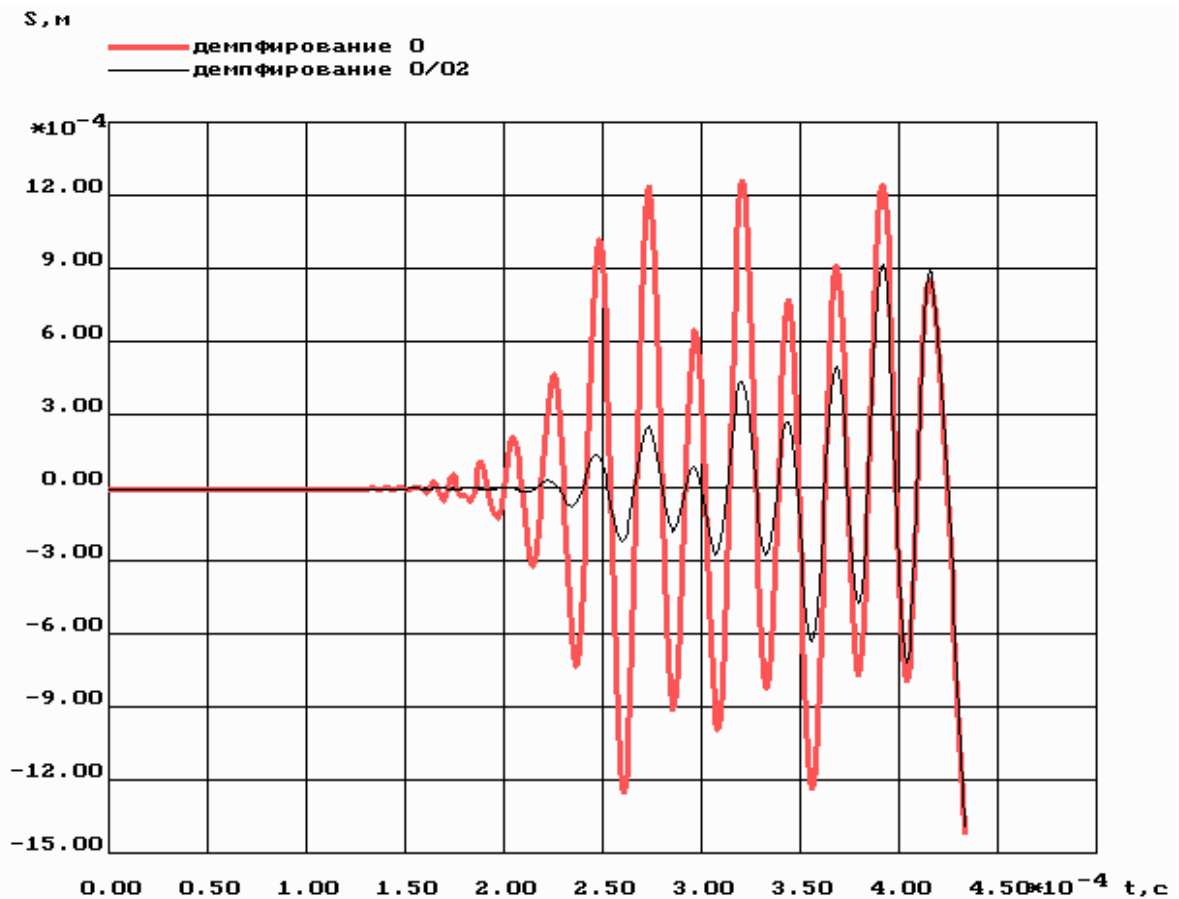


Рис. 10. Влияние демпфирования на колебания при бегущей нагрузке

На рис. 9 показаны вертикальные смещения правого конца пластины для различных длины и толщины в отсутствие демпфирования. Как можно заключить наибольшие колебания возникают в толстой и короткой пластине. В длинной и тонкой пластине колебания практически не возбуждаются.

На рис. 10 представлены графики, отражающие влияние демпфирования на колебания. Как следует из этих кривых демпфирование несколько задерживает возбуждение колебаний и снижает скорость их роста.

Выводы

1. Математическое моделирование процесса взаимодействия импульсной нагрузки (скользящей детонационной волны) с метаемой пластиной в условиях сварки взрывом показало, в последней возбуждаются вертикальные и угловые упругие колебания, причем в момент возбуждения такие колебания происходят с высокой частотой, которая падает с увеличением амплитуды.

2. Показано, что при увеличении толщины пластины колебания нарастают быстрее и начинаются раньше, а при увеличении длины пластины рост колебаний резко замедляется.

Библиографический список

1. Кудинов, В. М., Сварка взрывом в металлургии / В. М. Кудинов, А. Я. Коротеев. – М.: Металлургия, 1978. – 165 с.
2. Конон, Ю. А. Сварка взрывом / Ю. А. Конон, Л. Б. Певухин, А. Д. Чудновский; под ред. Кудинова В. М. – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.
3. Захаренко, И. Д. Сварка металлов взрывом / И. Д. Захаренко. – Минск: Навука і тэхніка, 1990. – 205 с.
4. Ватник, Л. Е. Некоторые особенности образования соединения при сварке взрывом листового биметалла / Л. Е. Ватник, А. Н. Кривенцов, В. С. Седых // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. трудов / ВолгПИ. – Волгоград, 1974. – Вып. 1. – С. 35-45.
5. Плакирование стали взрывом / А. С. Гельман, А. Д. Чудновский, Б. Д. Цемахович, И. Л. Харина. – М.: Машиностроение, 1978. – 191 с.
6. Кузьмин, С. В. Формирование соединений при сварке взрывом крупногабаритных металлических слоистых композиций / С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Ю. Г. Долгий // Сварочное производство. – 2002. – №5. – С. 48-53.
7. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 544 с.
8. Тарабрин, Г. Т. Влияние упругих волн на характер движения пластины под действием продуктов взрыва / Г. Т. Тарабрин, Ю. П. Трыков // Металловедение и прочность материалов: межвуз. сб. науч. трудов / ВолгГТУ. – Волгоград, 1997. – С. 5-13.
9. Горобцов, А. С. Программный комплекс расчета динамики и кинематики машин как систем твердых и упругих тел / А. С. Горобцов // Инженерный журнал: справочник. – 2004. – №9. – с. 40 - 43.