

# Метод измерения прогиба пластины в процессе электрогидравлического деформирования

\* В. М. Косенков, В. Г. Кузьменко

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, \*e-mail: [v.m.kosenkov@gmail.com](mailto:v.m.kosenkov@gmail.com)

Разработан экспериментальный метод измерения прогиба пластины в процессе ее деформирования, отличающийся относительно малыми затратами средств для его реализации и оперативностью получения конечных результатов. Обоснована его достоверность и определена погрешность измерения. Выполнена апробация метода на примерах деформирования пластин ударными волнами в воде, генерируемыми электрическими разрядами.

*Ключевые слова:* электрогидравлическое деформирование, высокоскоростная деформация, оптический метод измерения, электрический разряд в воде.

УДК 53.082.52:621.7.044.4

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается тенденция замены низкопрочных сталей для изготовления корпусных деталей в автомобильной промышленности на высокопрочные стали и высокопрочные алюминиевые сплавы. Это связано с необходимостью уменьшения массы автомобиля при сохранении прочности его корпуса для уменьшения затрат топлива и увеличения динамических характеристик автомобиля.

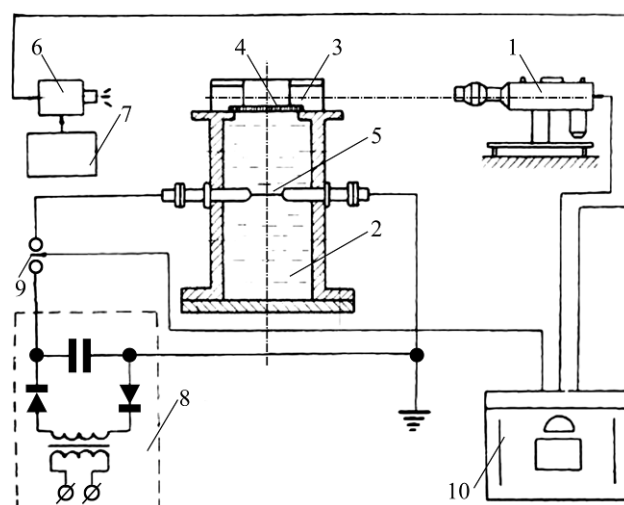
Существующие статические методы штамповки не позволяют эффективно деформировать высокопрочные стали и алюминиевые сплавы. Анализ современных публикаций в отечественных [1, 2] и зарубежных журналах [3, 4], а также опыт исследований, проводимых в ИИПТ [5], показывают, что импульсные методы штамповки корпусных деталей из высокопрочных листовых сплавов имеют существенные преимущества перед статическими методами.

Для разработки эффективных технологий штамповки корпусных деталей из листовых высокопрочных сплавов необходимо исследовать процессы их деформирования под действием волн давления, генерируемых электрическим разрядом в воде. Поэтому необходимо разработать метод определения прогиба пластины, с помощью которого можно выполнить анализ динамических процессов электрогидравлической штамповки листовых высокопрочных сплавов. Этот метод также может быть использован для тестирования такого эффективного метода исследования процессов электрогидравлического деформирования корпусных деталей, как математическое моделирование, которое позволяет прогнозировать результаты формовки деталей по заданным параметрам электрогидравлической системы [6–10]. Для проверки адекватности такой математической модели необходимо про-

вести экспериментальное исследование процесса деформации материала в результате изменения прогиба пластины.

Анализируя зарубежные и отечественные публикации, целесообразно разделить методы измерения прогиба пластины в процессе ее деформации волнами давления, генерируемыми электрическим разрядом в воде, на следующие группы: с применением высокоскоростных фоторегистраторов и высокоскоростных видеокамер.

В работе [1] динамический прогиб пластины регистрировался в экспериментальной установке скоростным фоторегистратором СФР-2М в отраженном свете со скоростью развертки 375 м/с диаметрального профиля. Упрощенная блок-схема данной экспериментальной установки изображена на рис. 1.



**Рис. 1.** Блок-схема экспериментальной установки для исследования изменения прогиба пластины (1 – фоторегистратор; 2 – рабочая камера; 3 – матрица с прорезью; 4 – заготовка; 5 – взрывающийся проводник; 6 – фотовспышка прибора подсветки; 7 – генератор питания прибора подсветки; 8 – генератор импульсных токов; 9 – разрядник; 10 – пульт СФР установки) [1].

Как отмечено в работе [2], в которой исследовалось формирование разряда в жидкости с применением высокоскоростного фоторегистратора СФР-2М, большое значение имеет синхронизация данного типа высокоскоростных регистраторов с началом формирования разряда в жидкости, а в нашем случае – с началом прогиба пластины.

Применение фоторегистраторов для измерения прогиба пластины имеет следующие преимущества:

- возможность получения снимков прогиба пластины с малым интервалом времени между ними (до 0,4 мкс);

- возможность определения профиля прогиба пластины с относительно малой погрешностью.

В то же время этот метод имеет ряд недостатков:

- относительно высокая стоимость расходных материалов;

- большие затраты времени для подготовки и проведения эксперимента;

- большие затраты времени для обработки полученных данных.

В работах [3, 4] использовался другой, более современный метод измерения прогиба пластины – с применением высокоскоростных видеокамер с частотой съемки 67500 кадров в секунду и разрешением 256×256 пикселей. На рис. 2 и 3 показаны крепление заготовки в экспериментальной оснастке и общий вид установки с высокоскоростными видеокамерами [3].

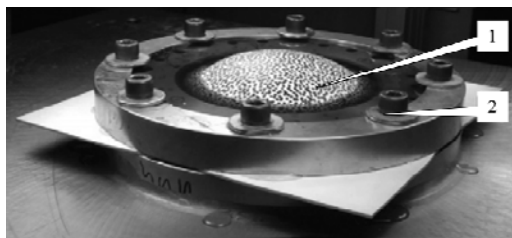


Рис. 2. Крепление заготовки (1) в экспериментальной оснастке (2) [3].



Рис. 3. Общий вид установки с высокоскоростными видеокамерами (High-speed Cameras – высокоскоростные видеокамеры; EHF Fixture – электрогидравлическая установка) [3].

Применение видеокамер для измерения прогиба пластины имеет следующие преимущества:

- возможность получения снимков прогиба пластины с малым интервалом времени между ними (до 13 мкс в работах [3, 4]);

- возможность определения профиля прогиба пластины с относительно малой погрешностью;

- отсутствие расходных материалов;

- одновременное измерение динамического прогиба всех сечений пластины.

В то же время этот метод имеет ряд недостатков:

- очень высокая стоимость видеокамер;

- высокая стоимость специального программного обеспечения для преобразования полученных изображений в координатную систему.

Отмеченные недостатки методов показывают актуальность разработки метода измерения прогиба пластины волнами давления, генерируемыми электрическим разрядом в воде, который не требует больших затрат на приобретение оборудования и программного обеспечения, а также позволяет оперативно обрабатывать экспериментальные данные.

Цель настоящего исследования – разработать экспериментальный метод определения изменения прогиба пластины в процессе ее деформирования волнами давления, генерируемыми электрическим разрядом в воде.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Анализируя возможные способы решения поставленной задачи для разработки метода измерения прогиба, мы пришли к выводу, что наиболее приемлемы оптические методы измерения, так как электрические и электромагнитные методы в условиях электрических разрядов испытывают существенные помехи от электромагнитных волн, а механические способы влияют на прогиб пластины и испытывают отскок чувствительного элемента от поверхности пластины, что также приводит к большим погрешностям измерения прогиба.

По измерению максимального прогиба круглых пластин в их центре, согласно работе [6], можно определить среднюю деформацию пластин, работу деформации и в конечном итоге механический КПД электрогидравлического деформирования пластин. Поэтому необходимо определить изменение прогиба пластины в ее центре. Это существенно упрощает разработку измерительной системы. Достаточно направить через щель в матрице поток света, который проходит параллельно плоскости пластины через ее центр от источника света и частично перекрывается пластиной в процессе ее прогиба. Уменьше-

ние светового потока можно регистрировать с помощью фотоэлемента, электрический сигнал которого записывается на осциллографе с цифровым выходом, а затем выполнять обработку сигнала с помощью компьютерной программы MS Excel.

### МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

Согласно постановке задачи, общая схема измерения прогиба пластины по предлагаемому методу показана на рис. 4.

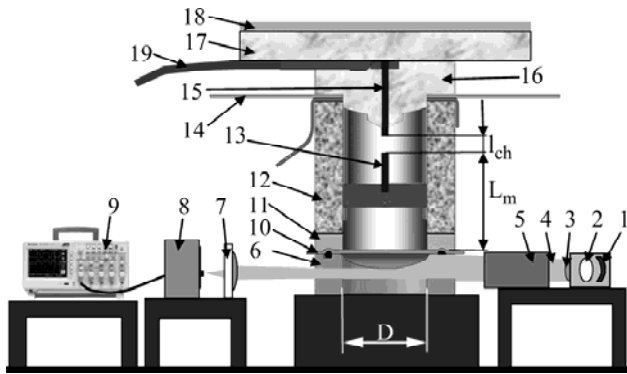


Рис. 4. Общая схема измерения прогиба пластины по предлагаемому методу.

Деформируемая пластина 10 устанавливалась на кольцевой матрице 6, прижималась кольцом 11, на которое устанавливался корпус разрядной камеры 12 с внутренним диаметром  $D$ . Внутри корпуса разрядной камеры 12 устанавливалась электродная система с низковольтным электродом 13 и высоковольтным 15. Расстояние между электродами 13 и 15 ( $l_{ch}$ ) можно было варьировать в пределах от 10 до 30 мм. Высоковольтный электрод 15 изолировался от корпуса камеры 12 и низковольтного электрода 13 полиэтиленовыми изоляторами 14 и 16. Место соединения высоковольтного кабеля 19 с электродом 15 изолировали полиэтиленовой прокладкой 17, которая прижималась траверсой 18. В результате электрического разряда между электродами 13 и 15 формировались волны давления, распространяющиеся в полости разрядной камеры 12, заполненной водой, и действующие на жестко заземленную пластину 10, вызывая ее деформацию. Расстояние от канала разряда до пластины равно  $L_m$ .

Измерение прогиба пластины выполняли с помощью оптической системы. В ней формировали практически параллельный световой поток 4 от источника света 2 (лампа накаливания) с помощью параболического зеркала 1 и асферической линзы 3. Для концентрации светового потока в направлении вертикальной щели кольцевой матрицы 6 использовали два плоских зеркала 5, существенно увеличивающие мощность

светового потока. Световой поток 4, проходя через щель в матрице 6, частично перекрывался пластиной 10, деформируемой волнами давления, генерируемыми каналом разряда, расположенным между электродами 13 и 15. Его интенсивность на выходе из щели уменьшалась пропорционально прогибу пластины 10. После пластины световой поток проходил через конденсорную линзу 7 и фокусировался на фотоэлементе 8, в качестве которого использовали фотодиод марки Forgard FYL-3522PD с временем релаксации 50 наносекунд. Электрический сигнал от фотоэлемента 8 поступал в осциллограф 9, в котором он регистрировался и преобразовывался в цифровую форму.

Фотодиод необходимо было подключить к источнику постоянного тока таким образом, чтобы полученный фотоэлемент обладал низким временем релаксации (не более 10 мкс) и достаточно высокой амплитудой сигнала (существенно превышающей уровень помех осциллографа). Выполнив анализ схемных подключений фотодиода и экспериментальную их проверку, была предложена электрическая схема, в которой реализуется приемлемое соотношение между амплитудой сигнала и временем его релаксации (рис. 5). Фотодиод работал в фотодиодном режиме, так как в электрической схеме присутствовал дополнительный источник тока (аккумуляторная батарея 12 В).

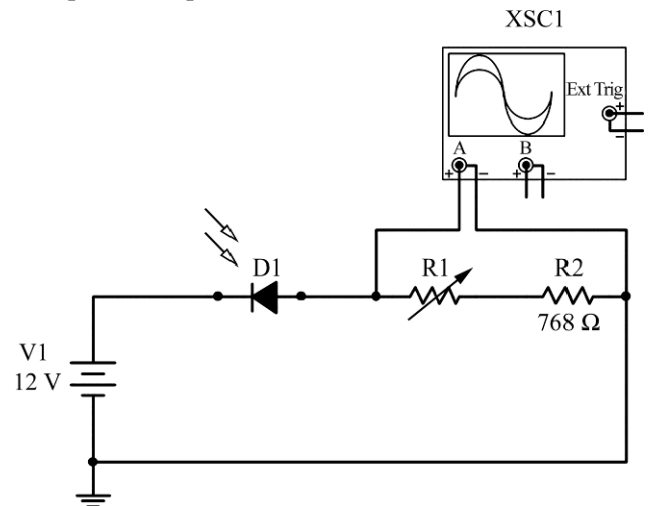


Рис. 5. Электрическая схема подключения фотоэлемента (V1 – источник постоянного тока (12 В); D1 – фотодиод; R1, R2 – нагрузочные резисторы; XSC1 – осциллограф).

Время релаксации предложенной электрической схемы подключения фотодиода, которая вместе с ним образовывала фотоэлемент, определяли методом освещения фотодиода короткими прямоугольными импульсами света с большой частотой следования. Для этого использовали светодиод марки Vishay TSAL6200 с временем релаксации 15 наносекунд, который под-

ключали к генератору импульсов Г5-63. Схема определения времени релаксации фотоэлемента показана на рис. 6.

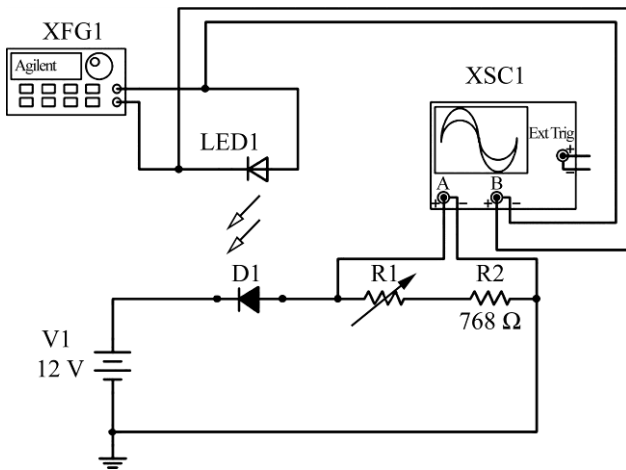


Рис. 6. Схема определения времени релаксации сигнала фотоэлемента, включенного в электрическую схему (V1 – источник постоянного тока (12 В); D1 – фотодиод; R1, R2 – нагрузочные резисторы; XSC1 – осциллограф; LED1 – светодиод; XFG1 – генератор импульсов).

В результате определили, что время релаксации фотоэлемента не превышает 1 мкс. Это время существенно меньше характерного времени процесса пластического деформирования листовых высокопрочных сплавов под действием волн давления, генерируемых электрическим разрядом в воде (200–400 мкс). Амплитуда сигнала фотоэлемента существенно (на два порядка) превышает уровень помех осциллографа.

Тарировку оптической системы выполняли по схеме, показанной на рис. 7. Обозначения на этом рисунке элементов 1–9 соответствуют обозначениям на рис. 4. Тарировку выполняли в статических условиях, перекрывая поток света через щель 11 в матрице 6 специальными тарировочными шаблонами 10. Использовали набор тарировочных шаблонов высотой  $\Delta l$  от 0 до 24 мм. Кроме того, была выполнена проверка возможного искажения светового потока за счет отражения от выпуклой поверхности полюса пластины, которая показала отсутствие такого искажения.

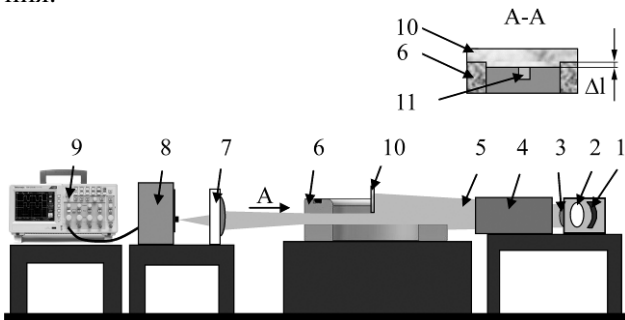


Рис. 7. Схема статической тарировки измерительной системы с помощью шаблонов.

В результате статической тарировки измерительной системы с помощью шаблонов была

получена зависимость сигнала фотоэлемента от высоты тарировочного шаблона  $\Delta l$  (рис. 8). Обработка данных, показанных на рис. 8, позволила определить зависимость изменения сигнала фотоэлемента от прогиба пластины (рис. 9). Данные, показанные на рис. 9 маркерами 1 и 2, аппроксимированы линейной зависимостью (показанной на рис. 9 линией 3):

$$\Delta l = 15,362 \cdot U - 5,3428, \quad (1)$$

где  $\Delta l$  – прогиб пластины, мм;  $U$  – электрический сигнал от фотоэлемента, В.

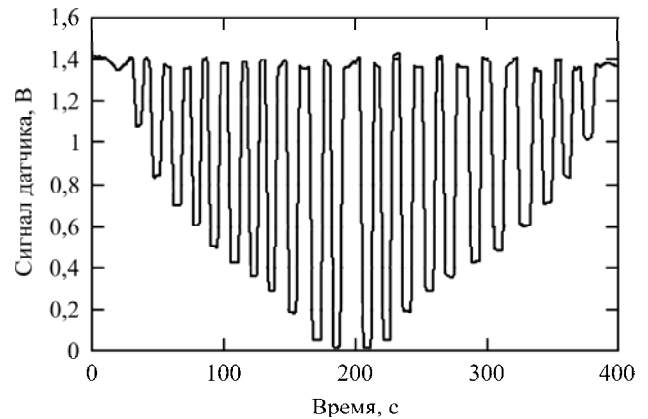


Рис. 8. Изменение сигнала фотоэлемента в зависимости от высоты тарировочных шаблонов  $\Delta l$ .

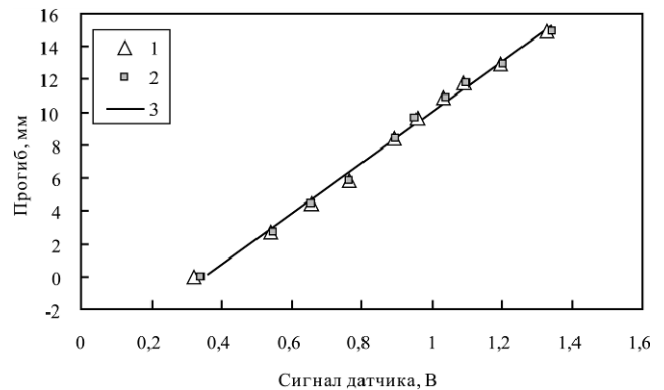


Рис. 9. Тарировочная кривая зависимости сигнала фотоэлемента от прогиба пластины. Точки на рисунке соответствуют постепенному закрытию (1) и открытию (2) щели в матрице шаблонами, а прямая линия (3) – результат аппроксимации этих точек.

Некоторая неравномерность яркости светового потока по высоте щели кольцевой матрицы определяет небольшую погрешность аппроксимации тарировочных данных зависимостью (1) в пределах от +3 до -5% (рис. 10).

Кривая электрического сигнала от фотоэлемента на экране осциллографа показана на рис. 11. На активной стадии электрического разряда элементы разрядного контура создают мощный электромагнитный импульс, интенсивность которого пропорциональна силе тока в электрической цепи. Фотоэлемент и кабель, соединяющий его с осциллографом, выполняют функцию антенны, на которую действует

электромагнитная волна, генерируемая разрядным контуром. В результате сигнал фотоэлемента на начальной стадии его изменения искажается электромагнитной помехой (высокочастотная составляющая в начале кривой на экране осциллографа на рис. 11). Эта помеха не позволяет определять прогиб пластины в начале ее деформирования, если начало деформирования находится в пределах времени разряда, однако после завершения разряда не препятствует его определению. В том случае, если волны давления достигают поверхности пластины после завершения разряда, тогда электромагнитная помеха отсутствует и определение прогиба пластины можно выполнять из ее невозмущенного состояния в течение всего времени деформирования.

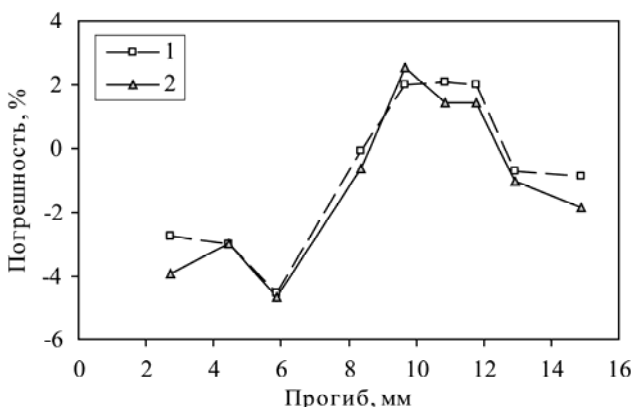


Рис. 10. Кривые погрешности аппроксимации тарировочных данных линейной зависимостью. Линии на рисунке соответствуют постепенному закрытию (1) и открытию (2) щели в матрице шаблонами.

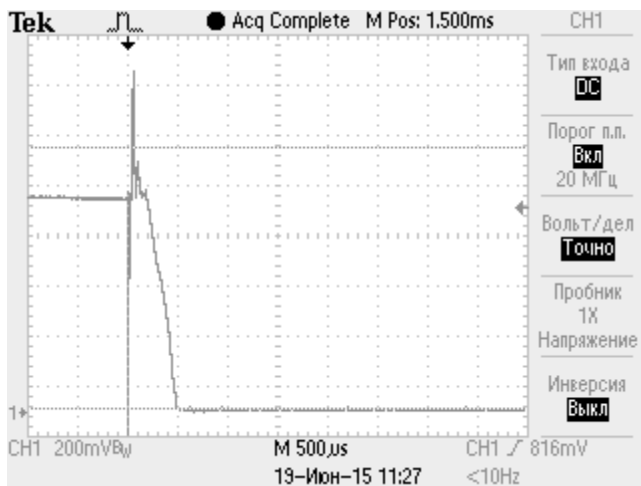


Рис. 11. Вид кривой сигнала датчика прогиба пластины на экране осциллографа.

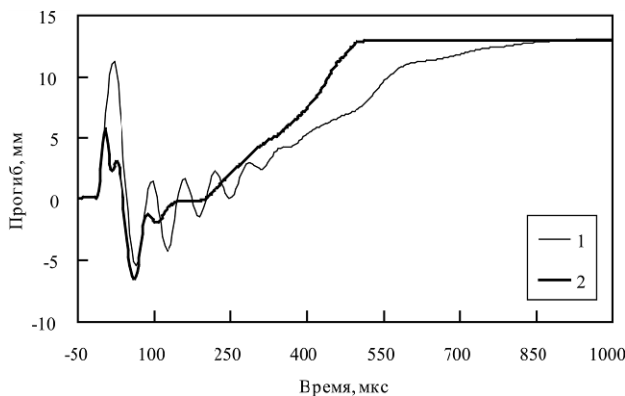
На процесс деформирования пластины существенно влияет не столько количество энергии, запасаемой в конденсаторной батарее ( $E_0$ ), сколько количество энергии, выделившееся в канале разряда ( $E_{ch}$ ) [8–11]. Для определения  $E_{ch}$  в процессе экспериментов выполняли запись осциллограмм силы тока и напряжения на канале разряда, по которым вычисляли  $E_{ch}$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

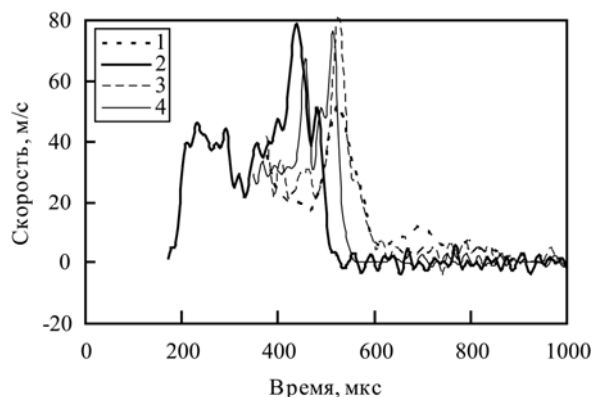
Проверку предлагаемого метода измерения прогиба пластины выполнили на экспериментальной установке (рис. 4), характеризуемой следующими параметрами: емкость конденсаторной батареи – 10 мкФ; напряжение заряда батареи – 30 кВ; индуктивность разрядного контура – 9 мкГн; расстояние между электродами  $l_{ch} = 20$  мм, расстояние от канала разряда до пластины  $L_m = 130$  мм; диаметр внутренней полости разрядной камеры и матрицы  $D = 120$  мм; высота корпуса разрядной камеры – 160 мм. Деформируемую пластину изготавливали из алюминиевого сплава 5754-T4 толщиной 1,4 мм.

Обработку экспериментальных данных выполняли с помощью разработанной нами программы на базе MS Excel. Прогиб пластины определяли по величине сигнала фотоэлемента, используя тарировочную функцию (1). Иницирование электрических разрядов микропроводником не выполняли, поэтому разряды отличались нестабильностью, приводящей к тому, что количество энергии, выделившейся в канале разряда, и длительность каждого из них существенно отличались друг от друга. В качестве примера на рис. 12 показано изменение прогиба двух пластин в процессе их деформирования при разных энергиях, выделившихся в канале разряда. Деформирование первой пластины происходило в условиях, обеспечивающих выделение энергии в канале разряда  $E_{ch} = 2031$  Дж (кривая 1 на рис. 12). В начале разряда электромагнитная помеха существенно изменяет сигнал, генерируемый фотоэлементом, в результате чего на кривой появляется искажение в виде затухающей синусоиды, амплитуда которой пропорциональна силе тока в разрядном контуре, а длительность соответствует времени протекания электрического тока в цепи (350 мкс). Деформирование второй пластины выполнялось в условиях более короткого разряда длительностью 160 мкс, в результате которого в канале разряда выделялась энергия  $E_{ch} = 3865$  Дж (кривая 2 на рис. 12). Электрический разряд в этом случае был завершён раньше, чем началось деформирование пластины. Поэтому помеха не отразилась на регистрации сигнала от фотоэлемента на всем временном интервале изменения прогиба пластины. Увеличение расстояния между каналом разряда и пластиной  $L_m$  также позволяет исключить влияние электромагнитной помехи на регистрацию сигнала от фотоэлемента. В дальнейшем при обработке сигналов от фотоэлемента исключали данные на временном интервале, на котором действует электромагнитная помеха.

Результаты обработки данных для четырех пластин показаны на рис. 13 и 14. На рис. 13



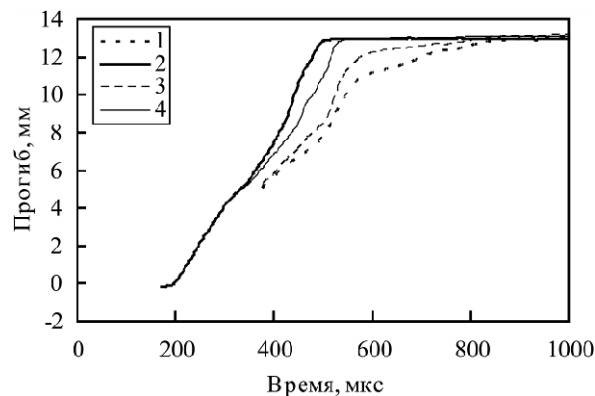
**Рис. 12.** Влияние электромагнитных волн на зависимости прогиба пластин из алюминиевого сплава 5754-T4 от времени в процессе их деформирования волнами давления, генерируемыми электрическими разрядами в воде, при энергии, запасаемой в конденсаторной батарее  $E_0 = 4500$  Дж. Линии на рисунке соответствуют  $E_{ch}$ , Дж: 1 – 2031; 2 – 3865.



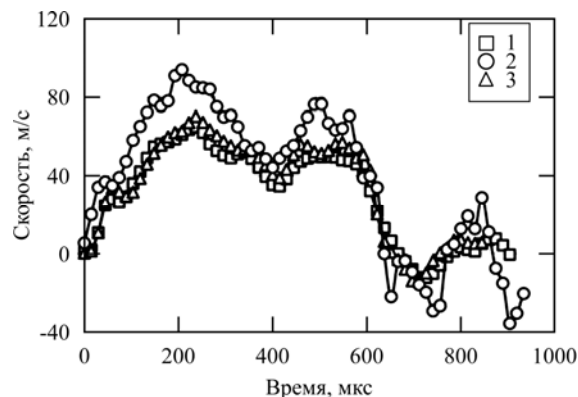
**Рис. 14.** Экспериментальные зависимости скоростей прогиба пластин из алюминиевого сплава 5754-T4 от времени в процессе их деформирования волнами давления, генерируемыми электрическими разрядами в воде, при энергии, запасаемой в конденсаторной батарее,  $E_0 = 4500$  Дж. Линии на рисунке соответствуют  $E_{ch}$ , Дж: 1 – 2031; 2 – 3865; 3 – 2006; 4 – 3000.

показаны изменения прогиба пластин при разных величинах энергии  $E_{ch}$ , выделившейся в канале разряда. Из рисунка следует, что прогиб пластины изменяется быстрее при увеличении энергии  $E_{ch}$ . В результате численного дифференцирования по времени кривых, показанных на рис. 13, вычислили скорости прогиба пластин (рис. 14). Анализ кривых на рис. 14 показывает, что максимальные значения скорости прогиба пластин изменяются в пределах от 50 до 80 м/с и в малой степени зависят от энергии  $E_{ch}$ . В целом изменение скорости по времени пропорционально  $E_{ch}$ .

Для дополнительной проверки разработанного метода измерения выполнили сравнение скорости прогиба пластин с данными деформирования алюминиевого сплава 5182-O [4], которые приведены на рис. 15. При деформировании сплава 5182-O [4] использовали большие энергии  $E_0$  и выполняли инициирование разряда в отличие от нашего исследования. По-видимому, это позволило выделять больше энергии в канале



**Рис. 13.** Экспериментальные зависимости прогиба пластин из алюминиевого сплава 5754-T4 от времени в процессе их деформирования волнами давления, генерируемыми электрическими разрядами в воде, при энергии, запасаемой в конденсаторной батарее,  $E_0 = 4500$  Дж. Линии на рисунке соответствуют  $E_{ch}$ , Дж: 1 – 2031; 2 – 3865; 3 – 2006; 4 – 3000.



**Рис. 15.** Экспериментальные зависимости скоростей прогиба центра пластин от времени в процессе их деформирования волнами давления, генерируемыми электрическими разрядами в воде, для алюминиевого сплава 5182-O [4]. Линии на рисунке соответствуют  $E_0$ , Дж: 1 – 9400; 2 – 15800; 3 – 21100.

разряда, но на большем промежутке времени. В конечном итоге скорости деформирования сплава 5182-O [4] ненамного больше, чем сплава 5754-T4. Это сравнение дополнительно характеризует возможность применения разработанного метода определения скорости прогиба пластин для исследования процессов их деформирования.

## ВЫВОДЫ

Разработан экспериментальный метод определения изменения прогиба пластины в процессе ее деформирования волнами давления, генерируемыми электрическим разрядом в воде, отличающийся относительно малыми затратами средств для его реализации и оперативностью получения конечных результатов. Выявлен способ тарировки измерительной системы. Разработана программа обработки данных на базе MS Excel. Предложенный метод измерения прогиба пластин высокопрочных сплавов прошел экспериментальную проверку и может быть использо-

ван для исследования динамики деформирования листовых материалов. Полученные данные позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Статическая тарировка фотоэлемента с помощью шаблонов обеспечивает погрешность определения прогиба пластины в пределах от +3 до -5%.

2. Время релаксации фотоэлемента не превышает 1 мкс, что обеспечивает высокое разрешение получаемых данных по времени.

3. Влияние электромагнитной помехи на измерение прогиба пластины не существенно, если длительность разряда меньше, чем время, за которое волны давления проходят расстояние от канала разряда до пластины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шкатов А.С., Резникова Л.Я., Сакалюк А.В. Методика проведения исследований по выбору оптимальных параметров электрогидроимпульсных установок. В сборнике научных трудов «Технологические особенности использования электрического взрыва». Киев: Наукова думка, 1983. С. 50–59.
2. Жекул В.Г., Раковский Г.Б. *ЖТФ*. 1983, **53**(1), 8–14.
3. Rohatgi A., Stephens E.V., Davies R.W., Smith M.T., et al. *J Mater Process Technol.* 2011, **211**, 1824–1833.
4. Rohatgi A., Stephens E.V., Davies R.W., Smith M.T., et al. *J Mater Process Technol.* 2012, **212**, 1070–1079.
5. Косенков В.М. *Письма о материалах*. 2014, **4**(1), 18–21.
6. Косенков В.М. *ЭОМ*. 2014, **50**(2), 81–90.
7. Golovashchenko S.F., Bessonov N.M. and Ilinich A.M. *J Mater Process Technol.* 2011, **211**, 875–885.
8. Kosenkov V.M., Bychkov V.M., Zhekul V.G. and Poklonov S.G. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2013, **49**(3), 241–246.
9. Kosenkov V.M., Bychkov V.M., Zhekul V.G. and Poklonov S.G. *Zh Tekh Fiz Lett.* 2012, **38**(9), 103–110.
10. Kosenkov V.M., Bychkov V.M. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2015, **51**(2), 167–173.
11. Дубовенко К.В. *ЭОМ*. 2013, **49**(1), 30–38.

Поступила 09.07.15

После доработки 12.08.15

#### Summary

An experimental method has been developed to measure the metal sheet bending under its deformation. This method requires a relatively low cost for its implementation and efficiency of obtaining final results. The credibility of this method is substantiated, and the measurement error is determined. The method has been tested through analyzing metal sheet deformations by shockwaves generated by an electrical discharge in water.

*Keywords: electrohydraulic forming, high-speed stressing, optical measurement method, discharge in water.*