

Влияние ориентации канала разряда в воде на кинематику прогиба пластины

* 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*

Выполнено экспериментальное исследование влияния ориентации канала разряда в воде и длины цилиндрической разрядной камеры на кинематические характеристики максимального прогиба пластин в процессе формовки в открытую кольцевую матрицу. В процессе исследования использовали разработанный авторами оптический метод измерения прогиба пластины в процессе ее деформирования волнами давления, генерируемыми электрическим разрядом в воде. Существенного влияния ориентации канала разряда и относительной длины цилиндрической разрядной камеры на прогиб пластины не обнаружено.

Ключевые слова: ориентация канала разряда, электрический разряд в воде, импульсное деформирование пластин, оптический метод измерения.

УДК 621.3.016.33:537.528

ВВЕДЕНИЕ

Импульсные методы деформирования листовых материалов волнами давления, генерируемыми электрическим разрядом в воде, имеют существенные преимущества по сравнению с квазистатическими методами [1–4]. Они позволяют деформировать высокопрочные сплавы, обеспечивая лучшее формообразование за счет увеличения относительного удлинения материала по сравнению с квазистатическим нагружением, возникающее в результате эффективной релаксации касательных напряжений в процессе высокоскоростного деформирования [5]. Разрядные камеры установок, используемых для штамповки листовых материалов, отличаются большим разнообразием формы внутренней полости, но во многих случаях она имеет цилиндрическую форму или близкую к ней [1–4, 6–9]. Руководствуясь результатами исследований электрического разряда в воде [10–12], выполненными в 70–80-е годы прошлого века, электродную систему устанавливают таким образом, чтобы ось канала разряда располагалась параллельно поверхности деформируемой пластины. Объяснялось это тем, что поверхность канала разряда генерирует ударные волны преимущественно в направлении, перпендикулярном его оси, и, следовательно, они обеспечивают большую нагрузку на пластину и ее деформацию. Однако не принималось во внимание, что деформируемая пластина в процессе движения генерирует в жидкости сначала волны разрежения, а впоследствии – сжатия, которые интерферируют с ударной волной и в начале движения уменьшают амплитуду и изменяют профиль волны, действующей на пластину. В результате характеристики волн, действующих на пластину,

могут существенно отличаться от первичной ударной волны, генерируемой каналом разряда. Также необходимо принимать во внимание, что в процессе деформирования пластины ее форма существенно отличается от первоначальной плоской поверхности, и поэтому ударные волны от последующих разрядов уже не будут действовать по нормали к ее поверхности. Кроме того, ударные волны, отраженные от внутренней поверхности разрядной камеры, действуют на поверхность пластины под разными углами. Эти соображения показывают научную и практическую актуальность исследования влияния ориентации канала разряда по отношению к поверхности пластины на процесс ее деформирования, что является целью данной работы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения намеченной цели исследования использовали разработанный нами метод регистрации максимального прогиба пластины в процессе ее деформирования [13]. Влияние ориентации канала разряда исследовали по изменению максимального прогиба пластины. Схема измерения прогиба пластины и ее нагружения волнами давления, генерируемыми каналом разряда, показана на рис. 1.

Деформируемую пластину 1 устанавливали на кольцевой матрице 2, прижимали кольцом 3, на которое устанавливали корпус разрядной камеры 4. Внутренний диаметр матрицы 2 равен внутреннему диаметру камеры 4 ($D = 120$ мм). Внутрь корпуса разрядной камеры 4 устанавливали электродную систему с заземленным 5 и высоковольтным 6 электродами, цилиндрические стержни которых имели диаметр 10 мм. Площадь поперечного сечения стержня электрода 5 не

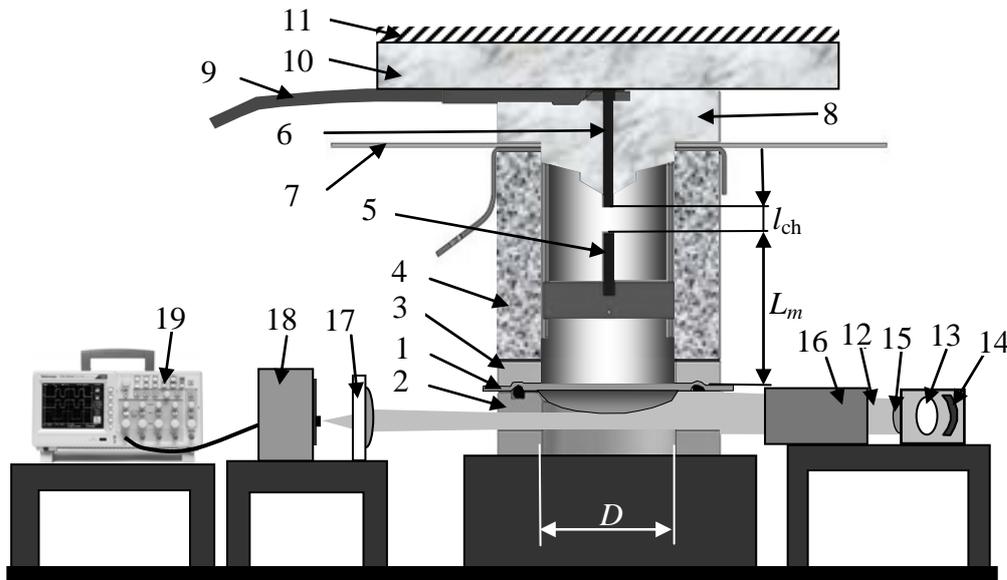


Рис. 1. Общая схема измерения прогиба пластины по предлагаемому методу.

превышает одного процента площади поперечного сечения разрядной камеры, поэтому он практически не экранирует деформируемую пластину 1. Стержень электрода 5 закрепляли на пластине толщиной 4 мм, расположенной в диаметральной плоскости разрядной камеры. Пластина, на которой устанавливали стержень электрода 5, в очень малой степени экранирует деформируемую пластину 1, так как площадь ее поперечного сечения в направлении распространения волн давления не превышает 5% от площади поперечного сечения разрядной камеры. Расстояние между электродами 5 и 6 (l_{ch}) можно было варьировать в пределах от 10 до 50 мм за счет выбора длины съемного стержня электрода 5. Высоковольтный электрод 6 изолировали от корпуса камеры 4 и заземленного электрода 5 полиэтиленовыми изоляторами 7 и 8. Место соединения высоковольтного кабеля 9 с электродом 6 изолировали полиэтиленовой прокладкой 10, которую прижимали траверсой 11. В результате электрического разряда между электродами 5 и 6 формировались волны давления, распространяющиеся в полости разрядной камеры 4, заполненной водой, и действующие на жестко заземленную пластину 1, вызывая ее деформирование. Расстояние от канала разряда до пластины равно L_m .

Измерение прогиба пластины выполняли с помощью оптической системы по методу, описанному в работе [13]. В этой системе формировали практически параллельный световой поток 12 от источника света 13 (лампа накаливания) с помощью параболического зеркала 14 и асферической линзы 15. Для концентрации светового потока в направлении вертикальной щели кольцевой матрицы 2 использовали два плоских зеркала 16, существенно увеличивающие мощность

светового потока. Световой поток 12, проходя через щель в матрице 2, частично перекрывался пластиной 1, деформируемой волнами давления, генерируемыми каналом разряда, расположенным между электродами 5 и 6. Его интенсивность на выходе из щели уменьшалась пропорционально прогибу пластины 1. После пластины световой поток проходил через конденсорную линзу 17 и фокусировался на фотоземеле 18, в качестве которого использовался фотодиод марки Forgyard FYL-3522PD со временем релаксации 50 наносекунд. Электрический сигнал от фотоземели 18 поступал в осциллограф 19, в котором он регистрировался и преобразовывался в цифровую форму.

Для достижения намеченной цели ориентировали канал разряда 20 вдоль оси разрядной камеры (рис. 2), а также перпендикулярно к ней (рис. 3) и исследовали влияние этих двух вариантов ориентации канала разряда на деформирование пластин. Такие варианты расположения канала в большей степени отличаются друг от друга, и если их влияние на прогиб пластины существенно, то оно будет наблюдаться в наибольшей степени. Обозначения на рис. 2 и 3 соответствуют обозначениям на рис. 1.

Чтобы обеспечить ориентацию канала разряда 20 вдоль оси разрядной камеры (рис. 2), изолировали внутреннюю цилиндрическую поверхность разрядной камеры 4 и прилегающих к ней частей заземленного электрода полиэтиленотерифталатной (лавсановой) пластиной 21 толщиной 0,1 мм, свернутой в цилиндрическую спираль. В середине перемычки 22 заземленного электрода выполнен прямоугольный паз (из которого удален стержень 5, показанный на рис. 1), обеспечивающий благоприятные условия для пробоя слоя воды между ним и высоковольтным электродом

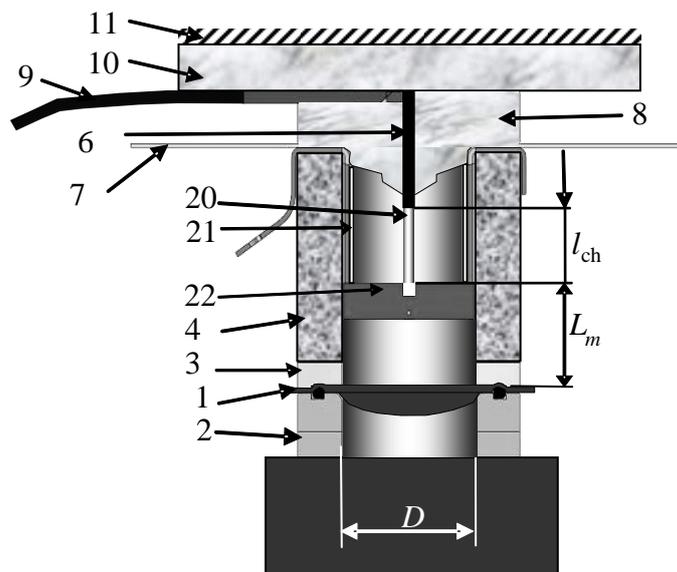


Рис. 2. Схема деформирования пластины при ориентации канала разряда вдоль оси разрядной камеры.

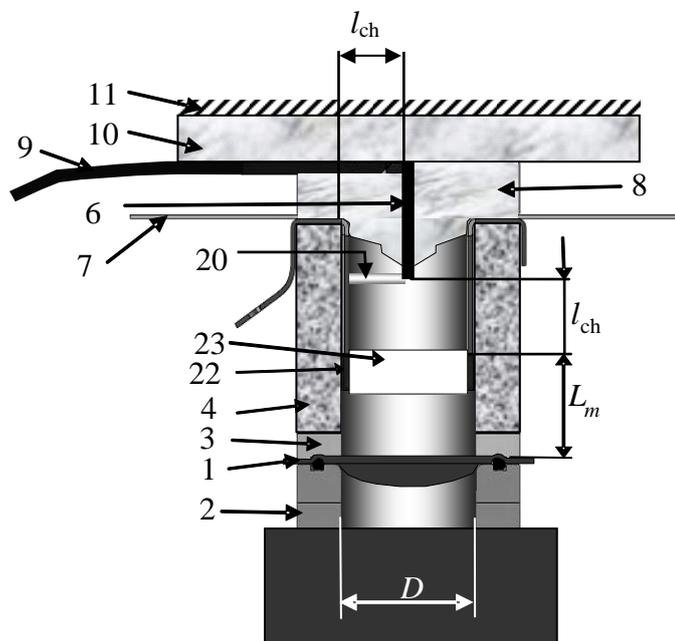


Рис. 3. Схема деформирования пластины при ориентации канала разряда перпендикулярно оси разрядной камеры.

6 вдоль оси разрядной камеры. Ориентацию канала разряда вдоль оси камеры контролировали по расположению прижогов от разряда на выступах прямоугольного паза перемычки 22.

Ориентацию канала перпендикулярно оси камеры обеспечивали электрической изоляцией перемычки 22 изолятором 23 (рис. 3) без установки изоляционной пластины 21 (рис. 2). Ориентацию канала разряда перпендикулярно оси камеры контролировали по расположению прижогов от разряда на цилиндрической поверхности разрядной камеры 4.

Предполагали, что на разных расстояниях канала разряда от пластины (L_m) его ориентация может различным образом влиять на деформирование пластины. Чтобы исследовать влияние ориентации канала при разных L_m , корпус раз-

рядной камеры выполнили из трех секций равной высоты. Благодаря этому расстояние от канала разряда, ориентированного вдоль оси разрядной камеры, до пластины можно было задавать равным 70, 230 или 390 мм (рис. 2). При этом расстояние от пластины до канала разряда, ориентированного перпендикулярно оси разрядной камеры, было больше на величину l_{ch} (рис. 3). Общий вид электродной системы показан на рис. 4 и 5 для большей наглядности ее конструкции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате экспериментальных исследований определены зависимости от времени максимального прогиба пластины в процессе ее деформирования, а также ее скорости в точках

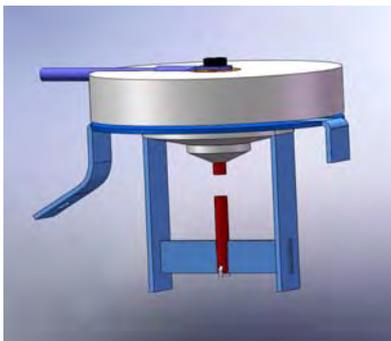


Рис. 4. Электродная система с регулируемым расстоянием между электродами.

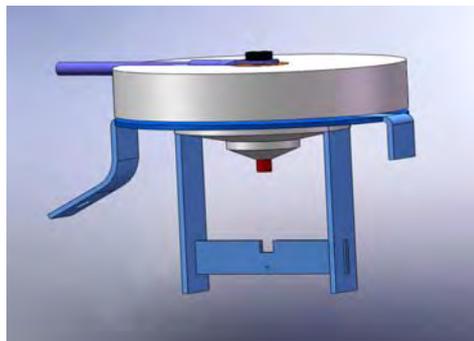


Рис. 5. Электродная система с постоянным расстоянием между электродами (стержень заземленного электрода удален).

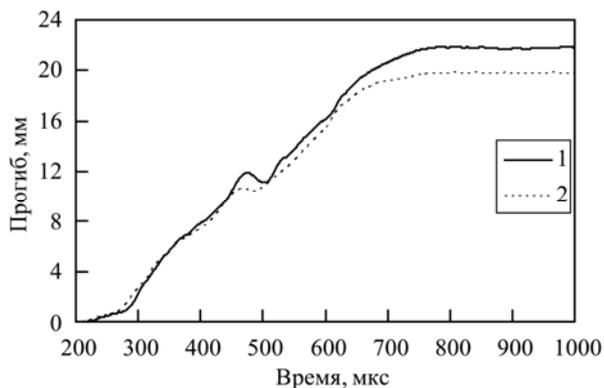


Рис. 6. Экспериментальные зависимости максимальной прогиба пластин от времени в процессе их деформирования волнами давления, генерируемыми электрическими разрядами в воде ($L_m = 230$ мм). 1 – канал разряда ориентирован вдоль оси камеры; 2 – канал разряда ориентирован перпендикулярно оси камеры.

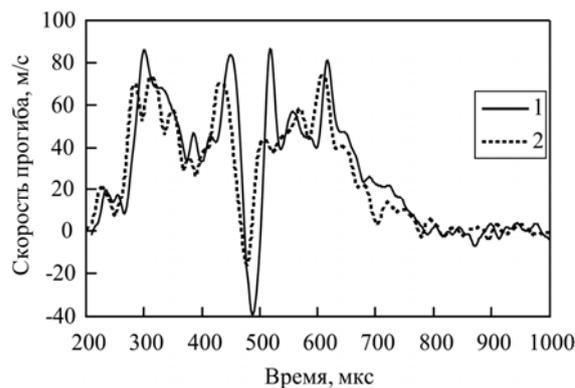


Рис. 7. Экспериментальные зависимости скорости максимальной прогиба пластин от времени в процессе их деформирования волнами давления, генерируемыми электрическими разрядами в воде ($L_m = 230$ мм). 1 – канал разряда ориентирован вдоль оси камеры; 2 – канал разряда ориентирован перпендикулярно оси камеры.

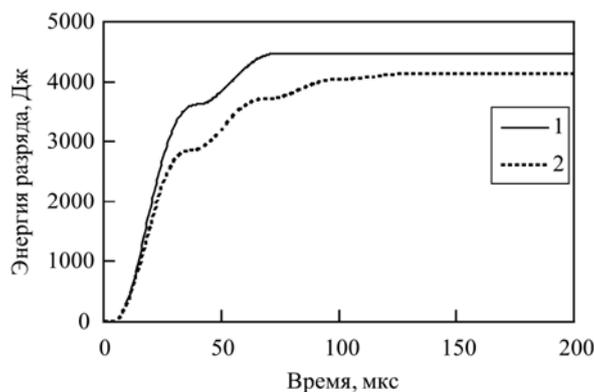


Рис. 8. Экспериментальные зависимости энергии, выделившейся в канале разряда, от времени ($L_m = 230$ мм). 1 – канал разряда ориентирован вдоль оси камеры; 2 – канал разряда ориентирован перпендикулярно оси камеры.

максимального прогиба. По осциллограммам напряжения и силы тока в разрядном контуре определяли изменение энергии, вводимой в канал разряда. На рис. 6–8 сплошными линиями 1 показаны осредненные результаты (по двум или трем разрядам), полученные, когда канал разряда ориентирован вдоль оси камеры, а штриховыми линиями 2 – при расположении канала разряда перпендикулярно оси камеры.

Расстояние между электродами (l_{ch}) вдоль оси камеры (рис. 2) и в перпендикулярном к ней направлении (рис. 3) было одинаковым и равно 50 мм. На эту величину было больше расстояние

до пластины от канала, ориентированного перпендикулярно оси камеры, по сравнению с каналом, ориентированным вдоль оси камеры. Минимальное расстояние от канала до пластины (L_m) изменяли в пределах от 70 до 390 мм за счет увеличения длины корпуса разрядной камеры путем установки дополнительных секций. Данные на рис. 6–8 соответствуют $L_m = 230$ мм. Для исследования влияния ориентации канала на прогиб пластин использовали листовый высокопрочный алюминиевый сплав 5754 толщиной 1,4 мм. Напряжение заряда конденсаторной батареи задавали равным 30 кВ, ее емкость –

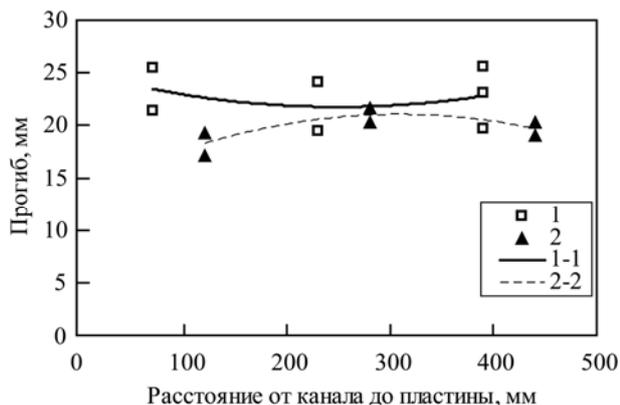


Рис. 9. Экспериментальные зависимости прогиба пластин из алюминиевого сплава 5754 от минимального расстояния между каналом разряда и пластиной. 1 – разряд вдоль оси цилиндрической камеры; 2 – разряд перпендикулярно оси цилиндрической камеры; 1-1 – аппроксимация данных 1; 2-2 – аппроксимация данных 2.

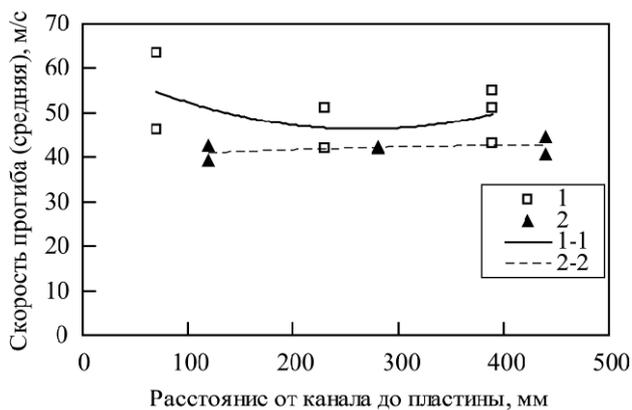


Рис. 10. Экспериментальные зависимости скоростей прогиба пластин из алюминиевого сплава 5754 от минимального расстояния между каналом разряда и пластиной. 1 – разряд вдоль оси цилиндрической камеры; 2 – разряд перпендикулярно оси цилиндрической камеры; 1-1 – аппроксимация данных 1; 2-2 – аппроксимация данных 2.

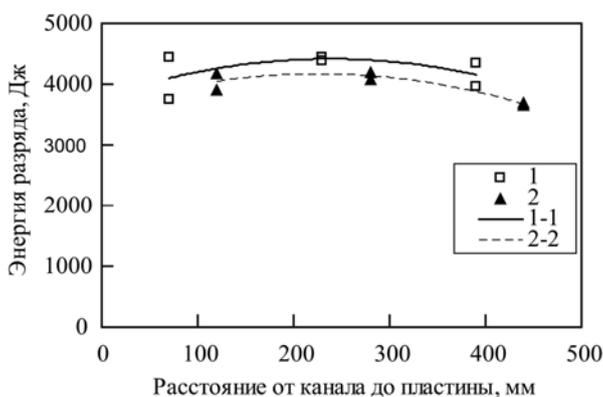


Рис. 11. Энергия, выделившаяся в канале разряда при заданном минимальном расстоянии между каналом разряда и пластиной. 1 – разряд вдоль оси цилиндрической камеры; 2 – разряд перпендикулярно оси цилиндрической камеры; 1-1 – аппроксимация данных 1; 2-2 – аппроксимация данных 2.

10 мкФ, индуктивность разрядной цепи – 9 мкГн. Начальная энергия в конденсаторной батарее 4,5 кДж.

Из рис. 6 и 7 следует, что изменение прогиба пластины практически не зависит от ориентации канала разряда в цилиндрической камере. Кривые на этих рисунках близки друг к другу количественно и имеют одинаковые качественные особенности. Их отличие пропорционально отличию энергии, выделившейся в канале разряда (рис. 8). Несмотря на практически одинаковые расстояния между электродами, при которых выполняли разряды вдоль оси камеры и перпендикулярно ей (отличие l_{ch} не более ± 1 мм), больше энергии выделялось при осевой ориентации канала разряда (рис. 8). Это можно объяснить меньшими потерями энергии от растекания тока в воде в результате установки изоляционной оболочки 21 (рис. 2).

Как следует из рис. 6–8, минимальное расстояние от канала разряда до пластины и ориентация канала разряда (при одинаковом количестве энергии, выделившейся в канале разряда) практически не влияют на качественные и количе-

ственные особенности процесса деформирования пластины волнами давления, генерируемыми электрическим разрядом в воде. Наиболее отчетливо это видно при сравнении максимальных остаточных прогибов пластин, расположенных на расстояниях до канала разряда от 70 до 440 мм и разной его ориентации (рис. 9). Аналогичным образом согласуются средние скорости пластического прогиба пластин (рис. 10). Наблюдаемые отличия прогибов и их средней скорости при разной ориентации канала разряда пропорциональны отличию количества энергии, выделившейся в канале разряда (рис. 11), поэтому влияние расстояния от канала разряда до пластины (в указанных пределах) на ее прогиб можно считать несущественным. Математические ожидания прогиба лежат в пределах статистического отклонения экспериментальных данных, не превышающего $\pm 10\%$. Статистическое отклонение данных, полученных при ориентации канала перпендикулярно оси камеры, меньше, чем при ориентации вдоль оси камеры, и не превышает $\pm 5\%$.

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет отметить, что схема ориентации канала разряда вдоль оси камеры (рис. 2) имеет некоторые преимущества по сравнению со схемой расположения канала разряда перпендикулярно оси камеры (рис. 3). Во-первых, она обеспечивает при одинаковом расстоянии между электродами и одинаковой энергии E_0 больший электрический КПД разряда (η_{ch}) и соответственно больший прогиб пластины, то есть более эффективное преобразование энергии E_0 , запасаемой в конденсаторной батарее, в энергию пластического деформирования пластины (КПД пластического деформирования η_p). Результаты, представленные на рис. 9 и 11, показывают, что η_{ch} увеличивается на 15%, а η_p (определенное по методу [14]) – на 20%. Во-вторых, схема ориентации канала разряда вдоль оси камеры (рис. 2) позволяет устанавливать расстояние между электродами в разрядных камерах малого радиуса и объема на величину, большую, чем их радиус. То есть дает возможность увеличивать расстояние между электродами и в результате увеличивать η_{ch} , а также η_p .

Увеличение объема разрядной камеры в три раза (за счет увеличения длины камеры в три раза) практически не привело к уменьшению пластического прогиба пластины. Из этого факта следует, что среднее давление на пластину во время ее деформирования не зависело от длины и объема разрядной камеры. Это возможно в том случае, когда нагрузка на пластину во время ее пластического деформирования создается не за счет квазистатического сжатия жидкости расширяющимся каналом разряда (впоследствии парогазовой полостью), а в результате действия волн, распространяющихся в разрядной камере. Волновой характер нагрузки, действующей на пластину, подтверждается особенностями изменения прогиба пластин в процессе их деформирования (рис. 6, 7). Прогиб пластин и скорость прогиба изменяются, в сущности, немонотонно. На некоторых интервалах времени давление на пластину уменьшается настолько, что происходит ее упругая разгрузка со скоростью прогиба до -40 м/с (рис. 7, интервал времени от 470 до 520 мкс). Подобные результаты, полученные в работе [12], объясняются интенсивной кавитацией жидкости вблизи пластины, сопровождающейся отрывом жидкости от ее поверхности. Следовательно, процесс деформирования пластины происходит в условиях большой неравномерности давления жидкости в разрядной камере, обусловленной дифракцией и интерференцией волн, генерируемых каналом разряда (впоследствии парогазовой полостью), а также деформируемой пластиной, скорость

прогиба которой на протяжении всего времени деформирования даже превышает скорость пульсации парогазовой полости. Это также подтверждается результатами, полученными на основе математической модели [15], а также в работах [16–18].

Поля давления в разрядной камере диаметром 120 и длиной 180 мм, а также прогиб деформируемой пластины в разные моменты времени от начала разряда, вычисленные с помощью математической модели, описанной в работе [15], показаны на рис. 12. В правом нижнем углу рис. 12 дана цветовая шкала давления, в которой отдельно выделен голубой цвет, обозначающий давление кавитации жидкости. Контур сечения канала разряда (впоследствии парогазовой полости) и деформируемой пластины показан лиловым цветом. Из рис. 12 следует, что в течение всего процесса пластического деформирования пластины существуют большие градиенты давления в разрядной камере от давления кавитации до десятков МПа, которые не могут наблюдаться при квазистатическом сжатии жидкости расширяющимся каналом разряда (впоследствии парогазовой полостью), а могут появляться только при волновых процессах в ней.

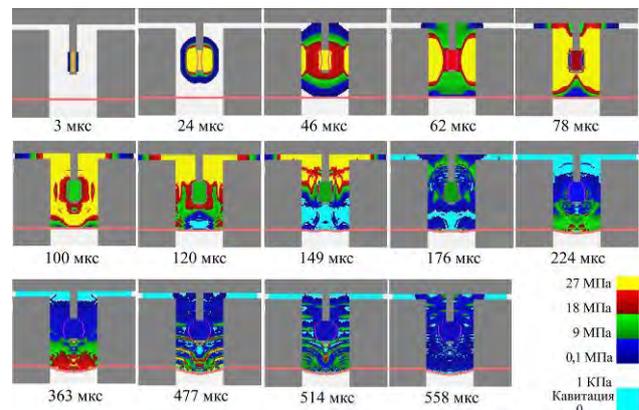


Рис. 12. Поля давления в разрядной камере и прогиб деформируемой пластины в разные моменты времени от начала разряда.

Из рис. 6 и 7 следует, что первичная ударная волна, генерируемая в начале разряда, в исследованном диапазоне изменения параметров системы обеспечивает малый прогиб пластины (не более 1 мм) вследствие быстрого уменьшения давления из-за интерференции с волнами разрежения, генерируемыми движущейся пластиной. На рис. 6 это явление соответствует первому замедлению прогиба («полочка» на кривых прогиба в начале деформирования пластин), а на рис. 7 – первое уменьшение скорости прогиба пластин от 20 до 8 м/с.

Этот факт позволяет объяснить, почему ориентация канала разряда практически не влияет на деформирование пластины. Ориента-

ция канала разряда явно выражена только в начале его расширения, когда его длина намного больше диаметра. В это время он генерирует первичную ударную волну, которая не вызывает большой прогиб пластины. При расширении канала разряда с большой скоростью (200–400 м/с) его форма за относительно малое время (150–250 мкс) существенно изменяется, приближаясь к форме, подобной сферической (рис. 12), и его начальная ориентация фактически изменяется, приближаясь к неопределенной, как у сферы. Такое преобразование формы канала разряда происходит при любой его начальной ориентации в пространстве. Поэтому дальнейшее формирование волн давления каналом разряда (впоследствии парогазовой полостью) практически не зависит от его начальной ориентации и обеспечивает одинаковую нагрузку на деформируемую пластину. Если минимальный размер полости разрядной камеры больше максимального размера парогазовой полости, образовавшейся в результате разряда, тогда и форма камеры практически не влияет на трансформацию формы канала разряда. То есть подобные преобразования формы канала разряда будут происходить не только в камерах цилиндрической геометрии.

Малое влияние длины цилиндрической разрядной камеры на прогиб пластины можно объяснить незначительным изменением характеристик волн, распространяющихся вдоль разрядной камеры, как по волноводу постоянного сечения с жесткими стенками. Соответственно давление на пластину, обеспечивающее ее деформирование, также мало зависит от расстояния, пройденного волнами от канала разряда до пластины.

ВЫВОДЫ

В выполненном исследовании на основе полученных экспериментальных данных определено влияние ориентации канала разряда в цилиндрической разрядной камере, а также относительной длины цилиндрической разрядной камеры на процесс деформирования пластин. Полученные результаты позволяют сделать следующие основные выводы.

Ориентации канала разряда в цилиндрической камере (при одинаковом количестве энергии, выделившейся в канале разряда) практически не влияют на процесс упругопластического деформирования пластин. Отличие прогиба пластин при разной ориентации канала разряда не превышает статистического отклонения экспериментальных данных в пределах $\pm 10\%$.

Расстояние от канала разряда до пластины в цилиндрической камере (при одинаковом коли-

честве энергии, выделившейся в канале разряда) в малой степени влияет на качественные и количественные особенности процесса деформирования пластин волнами давления, генерируемыми электрическим разрядом в воде. Увеличение длины разрядной камеры в два раза уменьшает максимальный прогиб пластины не более чем на 10%. Дальнейшее увеличение длины камеры практически не изменяет максимальный прогиб пластины.

Несущественное влияние ориентации канала разряда в цилиндрической камере и ее длины на пластическую деформацию пластин позволяет заключить, что основное деформирование пластин происходит под действием вторичных волн давления и разрежения, генерируемых поверхностями канала разряда (впоследствии парогазовой полостью), пластины и кавитационной полости отрыва жидкости от пластины. Первичные ударные волны, генерируемые каналом разряда, создают относительно малые пластические прогибы пластин, не превышающие 5% от их максимального конечного прогиба в заданном диапазоне изменения параметров исследованной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гулый Г.А. *Научные основы разрядно-импульсных технологий*. Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
2. Golovashchenko S.F., Bessonov N.M., Ilinich A.M. *J Mater Process Tech.* 2011, **211**, 875–885.
3. Rohatgi A., Stephens E.V., Soulami A., Davies R.W., et al. *J Mater Process Tech.* 2011, **211**, 1824–1833.
4. Rohatgi A., Stephens E.V., Soulami A., Davies R.W., et al. *J Mater Process Tech.* 2012, **212**, 1070–1079.
5. Косенков В.М. *Письма о материалах*. 2014, **4**(1), 18–21.
6. Косенков В.М. *ЖТФ*. 2011, **81**(10), 133–139.
7. Дубовенко К.В. *ЭОМ*, 2013, **49**(1), 30–38.
8. Блащенко А.Д., Половинка В.Д., Тертилов Р.В. *ЭОМ*, 2013, **49**(1), 97–101.
9. Барбашова Г.А. *ЭОМ*, 2012, **48**(3), 83–87.
10. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. *Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде*. Киев: Наукова думка, 1979. 208 с.
11. Барбашова Г.А., Иванов А.В. *Гидромеханика*. 1986, (53), 16–19.
12. Чачин В.Н., Шадуя В.Л. *Импульсные методы обработки материалов*. Минск: Наука и техника, 1977, 44–55.
13. Косенков В.М., Кузьменко В.Г. Метод измерения прогиба пластины в процессе электрогидравлического деформирования. *ЭОМ*. 2016, **52**(5), 95–101.
14. Kosenkov V.M. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2014, **50**(2), 183–193.

15. Shcherba A.A., Kosenkov V.M., Bychkov V.M. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2015, **51**(6), 581–588.
16. Mamutov V., Golovashchenko S., Mamutov A. *Proceedings of the 13th International LS-DYNA Conference.* June 8–14 2014. Detroit, USA, 2014. 1–9.
17. Мамутов А.В., Мамутов В.С. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.* 2014, **190**(1), 101–107.
18. Hassannejadasl Amir. Simulation of Electrohydraulic Forming Using Anisotropic, Rate-dependent Plasticity Models. *Electronic Theses and Dissertations.* 2014, (5), 520.

*Поступила 15.03.16
После доработки 06.07.16*

Summary

An experimental investigation of the influence of orientation of a discharge channel in water and the length of a cylindrical discharge chamber on kinematic characteristics of the maximum deflection of the plates in the moulding process into an open annular matrix. In the process of the research they used an optical method for measuring deflection of the plate during its deformation by pressure waves generated by an electric discharge in water developed by the authors. A significant effect of orientation of the discharge channel and a relative length of a cylindrical discharge chamber on deflection of a plate is not detected.

Keywords: orientation of the discharge channel, an electric discharge in water, pulse deformation of plates, optical measuring method.