

doi: 10.32620/oikit.2021.92.06

УДК 539.374+621.044.4

М. Е. Тараненко, А. Г. Нарыжный

Моделирование процесса взаимодействия импульсной струи с заготовкой при электрогидравлическом нагружении

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

ЭГ-штамповка тонколистовых крупногабаритных деталей показала свою технико-экономическую эффективность, в том числе возможность получать детали сверхвысокой точности. При этом заготовки нагружают на ЭГ-прессах большой запасаемой энергии (до 500 кДж), обладающих возможностью пространственно-временного управления нагружением. Такое управление осуществляется с помощью многоконтурных разрядных блоков, в которых в одно целое объединены десятки разрядных полостей. Управляемыми параметрами могут быть электрические параметры десятков разрядных контуров генератора импульсов тока, объем и шаг расположения разрядных полостей, их высота до заготовки, а также последовательность разрядов во времени (одновременное или со сдвигом во времени ЭГ-разрядов в соседних разрядных полостях). Выбор рациональных диапазонов этих параметров невозможно без численного моделирования процессов, происходящих в разрядном объеме всего блока.

При моделировании комплексно рассматривались процессы выделения тепловой мощности при ЭГ-разряде, образования и распространения парогазового пузыря, генерирующего затопленную струю жидкости, и деформирования податливой заготовки при воздействии на нее такой струи.

Изложены результаты численных экспериментов в среде LS-DYNA с использованием метода ALE при ЭГ-разряде в одиночной разрядной (погружной) камере, в двух и трех соседних при разных варьируемых условиях: расстоянии от зоны разряда до заготовки (дистанции разряда) и смещении во времени двух и трех разрядов в соседних разрядных полостях. В качестве сравниваемых параметров были выбраны: перемещения точек заготовки и их скорости, распределение деформаций по поверхности заготовки и работа деформации. Показана адекватность модели реальному процессу. Предложена энергетически эффективная энерговыделяющая ячейка для генерации ЭГ-разрядов от управляемого во времени многоконтурного генератора импульсных токов.

Ключевые слова: электрогидравлический разряд, разрядная полость, заготовка, ударные волны, гидросток, парогазовый пузырь, скорость, интенсивность пластических деформаций, работа деформации.

Введение

Электрогидравлическая штамповка (ЭГШ) с пространственно-временным управлением нагружения заготовки имеет преимущество перед другими видами штамповки крупногабаритных деталей [1 – 3]. Управляемыми параметрами могут быть электрические параметры десятков разрядных контуров генератора импульсов тока, объем и шаг расположения разрядных полостей, их высота до заготовки, а также последовательность разрядов во времени. Особенности этих процессов штамповки полностью не исследованы экспериментально и методами компьютерного моделирования. Это объясняется рядом объективных причин. Однако в последнее время появились условия для широкого применения компьютерного моделирования процессов взаимодействия импульсной нагрузки с заготовкой в многоэлектродных разрядных блоках ЭГ-прессов [3 – 5]. В указанных работах в значительной мере подтверждена адекватность предложенной модели, а результаты численных экспериментов изложены ниже.

Условия моделирования

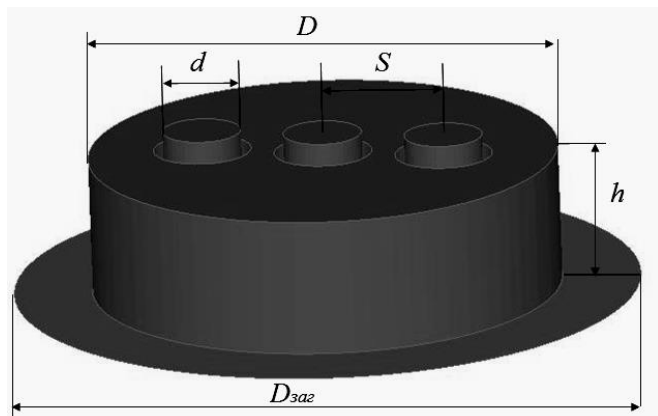


Рис. 1. Трёхплоскостная расчётная схема численного моделирования:

D – диаметр камеры; d – диаметр разрядной полости; S – расстояние между осями погружных камер; h – дистанция разряда; $D_{заг}$ – диаметр заготовки

Для исследования была принята технологическая схема многоконтурного электрогидравлического преса большой запасаемой энергии, оснащенного многоэлектродным разрядным блоком (МРБ). Схематично такой блок соответствует типовым МРБ преса ПЭГ-ХАИ-500 [1]. Рассматривается система (рис. 1), состоящая из трех разрядных полостей, погруженных в жидкость. Под ними расположена деформируемая заготовка, она установлена на вытяжную матрицу диаметром 252 мм. Диаметр заготовки – 320 мм и она прижата к матрице. Этими условиями исключается вытяжка материала заготовки с фланца в полость матрицы.

Зона выделения энергии в разрядной полости располагалась асимметрично относительно оси полости и на некотором расстоянии от ее дна. Это соответствует реальной конструкции. Геометрические размеры модели:

- диаметр разрядной полости – 40 мм, глубина зоны выделения энергии от торца полости – 30 мм;
- шаг расположения разрядных полостей – 60 мм;
- расстояние от торца разрядной полости до заготовки выбиралось в четырех вариантах: 40, 32, 20 и 12 мм. Это соответствует относительным дистанциям разряда d/h , равным 1,0; 0,75; 0,5 и 0,25. Последнее значение наиболее близко к экспериментальным условиям.

Последовательность численного эксперимента была выбрана следующей:

1. Рассмотрение механизма деформирования заготовки при одиночном разряде в центральной разрядной полости на выбранных дистанциях;
2. Определение механизма возникновения импульсной нагрузки при разрядах в двух полостях (центральной и боковой), смещённых во времени;
3. Установление взаимодействия трёх разрядов, из них – в двух боковых полостях одновременно и в центральной полости – смещённых во времени.

Расчет процесса выделения энергии при высоковольтном подводном разряде проводился при условии выделения некоторого количества тепловой энергии (9,375 кДж) в течение 32 мкс в объеме канала сплошной проводимости. При этом не рассматривались потери энергии на образование ударных волн, испарение материала электродов и другие теплотери. При этом функция мощности тепловыделения представлялась в виде треугольника высотой

400 МВт и основанием 32 мкс. Эти значения согласуются с аналогичными параметрами, приведенными в работе [1].

Была выбрана заготовка диаметром 320 мм и толщиной 1,0 мм. Ее материал – упруго-пластический алюминиевый сплав со степенным деформационным упрочнением вида

$$\sigma_T = Ae^n,$$

где $A = 604,9$ МПа;

$n = 0,275$.

Начальное значение предела текучести – 100 МПа, плотность – 2100 кг/м³, модуль упругости – 70000 МПа, коэффициент Пуассона – 0,33. Эти механические свойства приблизительно соответствуют широко применяемым сплавам типа АМг6 или Д16АТ.

Моделирование проводилось в среде LS-DYNA с использованием метода ALE.

Результаты моделирования

1. При реализации первого этапа получена последовательная картина развития парогазового пузыря (ПГП) внутри разрядной полости в объеме жидкости под заготовкой и при его взаимодействии с ней (рис. 2). Темная область внутри разрядной полости (выделенная более мелкой сеткой) постепенно увеличивается и выдавливает жидкость из полости. На кадре 130 мкс ПГП выходит за пределы разрядной полости в сторону заготовки. К этому моменту заготовка (первоначально тонкая жирная линия) приобретает определенный прогиб (искривление линии) под действием ударных волн, распространяющихся с более высокой скоростью, чем границы ПГП.

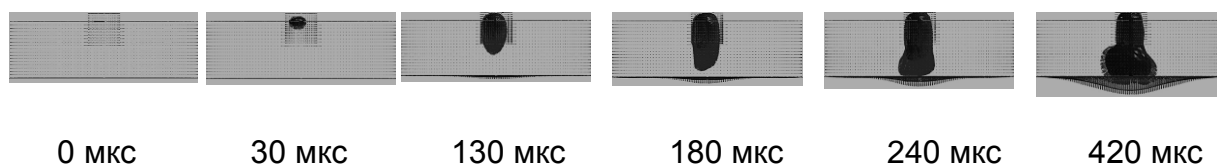


Рис. 2. Последовательность развития ПГП при одиночном ЭГ-разряде и его взаимодействие с деформируемой заготовкой на дистанции $1,0d$

При дальнейшем расширении ПГП принимает цилиндрическую форму со скругленной головной частью (кадр 180 мкс). По мере приближения к заготовке головная часть ПГП начинает расширяться под действием отраженных от заготовки волн сжатия. В дальнейшем эта часть ПГП продолжает расширяться в горизонтальном направлении (кадр 420 мкс), т. е. энергия, заключенная в нем, расходуется непродуктивно с точки зрения деформирования заготовки.

При изменении дистанции разряда h процесс принципиально не отличается за исключением финальной стадии взаимодействия ПГП с заготовкой (рис. 3). На дистанции 32 мм ПГП принимает грибообразную форму с явно выраженной оставшейся цилиндрической частью, которая находится в разрядной полости. Степень расширения ПГП в горизонтальном направлении значительно больше, чем на дистанции 40 мм (см. рис. 2), т. е. непродуктивных потерь энергии больше.

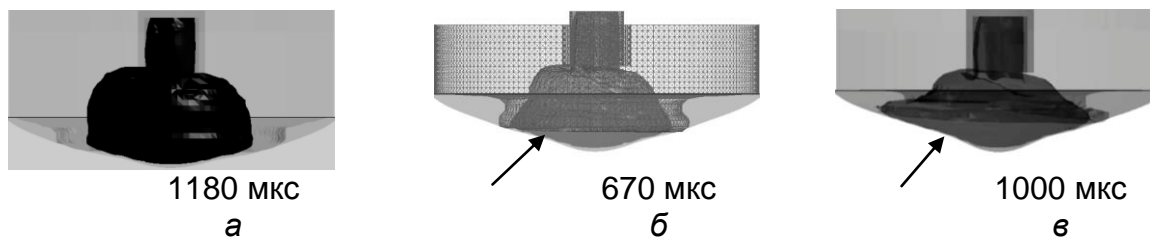


Рис. 3. Формы ППП и заготовки на заключительных этапах деформирования заготовки на разных дистанциях:
 а – 32 мм; б – 20 мм; в – 12 мм. Стрелками отмечена немонотонность выпуклой формы заготовки

На заключительном кадре варианта с дистанцией 20 мм (рис. 3, б) видно, что ППП расширяется в вертикальном направлении и пересекает плоскость торца разрядной полости.

Такое движение наблюдается и на кадре 1000 мкс (рис. 3, в). Это означает, что в этих двух случаях сопротивление деформированию заготовки превышает сопротивление расширенного ППП в сторону, противоположную размещению заготовки. Это является непродуктивной тратой энергии разряда. Частично такой вывод подтверждается сравнением окончательных прогибов заготовки: при дистанции 40 мм максимальный прогиб составляет 35 мм, а при дистанции 12 мм – 41 мм.

Такой механизм взаимодействия ППП и заготовки свидетельствует о том, что в технологических устройствах, в которых реализуется подобная схема нагружения заготовки, целесообразно ограничивать расширение ППП в вертикальном направлении, т. е. границы вокруг выходного отверстия разрядной полости должны быть жесткими.

Моделирование процесса деформирования плоской заготовки показывает, что ее напряженно-деформированное состояние меняется не монотонно, а волнообразно. На рис. 4 показано последовательное изменение третьей главной деформации (деформации по толщине) заготовки в плановой проекции. Видны кольцевидные волны изменения деформации утонения. Подробней механизм распространения продольных пластических волн, возникающих в заготовке при взрывном нагружении, описан в работе [7].

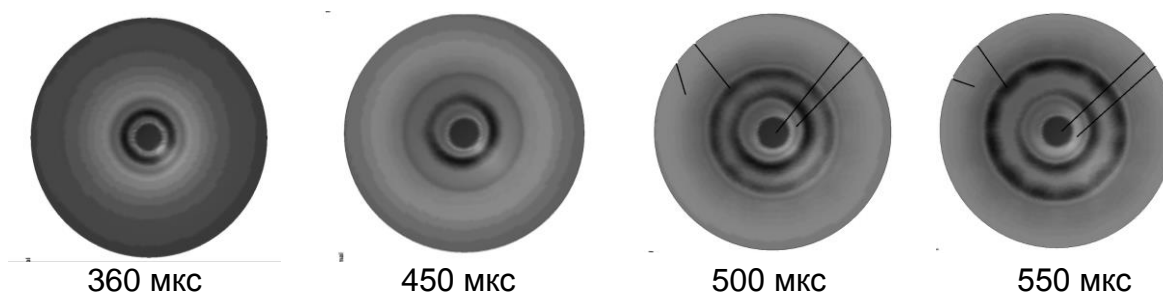


Рис. 4. Характер изменения третьей главной деформации при импульсном нагружении на дистанции 12 мм ($0,3 \frac{d}{h}$)

Расчёт значений максимального давления на смачиваемой поверхности заготовки при воздействии на неё ПГП в зависимости от параметра h показал его соответствие функции h^{-2} в начале процесса деформирования и практическое равенство значений P_{max} в конце деформирования для всех исследуемых дистанций.

2. Для уменьшения доли непродуктивно расходуемой энергии можно предложить осуществление двух ЭГ-разрядов в соседних разрядных полостях. При этом возникает вопрос о рациональном времени сдвига начала каждого из разрядов. Для определения этого параметра была рассчитана работа пластической деформации в зависимости от сдвига во времени начала двух разрядов (рис. 5). Расчёт показал, что максимальная работа деформации заготовки соответствует времени сдвига 350 мкс. При этом такая кривая в области максимальных значений довольно пологая. Это позволяет технически упростить систему синхронизации разрядов.

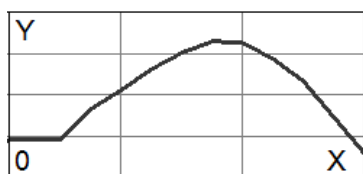


Рис. 5. Характер работы пластической деформации (ось Y) в зависимости от сдвига начала второго импульса во времени (ось X)

Для осуществления численного моделирования было принято условие – процесс расчета начинается одновременно в двух камерах, но в левой в течение первых 350 мкс выделяется 0,1 % запасаемой энергии, а затем начинает выделяться 99,9 % запасенной энергии. Таким образом, можно считать, что процесс расширения ПГП в левой камере происходит с задержкой 350 мкс. Это видно на кадрах 30 и 150 мкс, на которых наблюдается очень медленный процесс роста объема ПГП. На кадрах 500 мкс и последующих видно расширение ПГП в левой полости уже с большей скоростью. В общем процесс развития двух ПГП более медлен-

ный, чем аналогичный процесс в одиночной полости. Его длительность составляет 3000 мкс (в одиночной камере при аналогичных условиях – 1700 мкс). Можно объяснить это взаимодействием ударных волн, возникающих в разрядных полостях в момент пробоя межэлектродного промежутка с образованием канала сквозной проводимости (диаметром 0,1...1,0 мм), не учитываемого применяемой вычислительной моделью. В подтверждение этого предположения заметен небольшой прогиб заготовки на кадре 300 мкс.

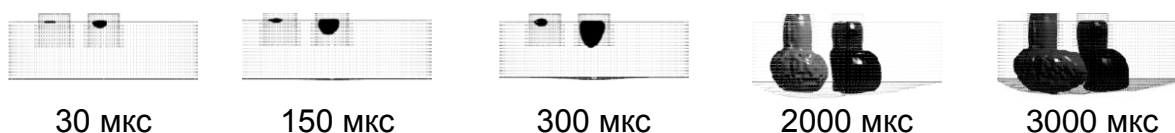


Рис. 6. Последовательность развития двух ПГП при двойном ЭГ-разряде (между центрами разрядов – 60 мм) и их взаимодействие с деформируемой заготовкой (расстояние до заготовки – 40 мм)

На рис. 6 видно искажение формы правого ПГП. К концу процесса оба ПГП смыкаются, но не смешиваются. Правый ПГП смещается вправо и в нем заметны значительные горизонтальные составляющие движения.

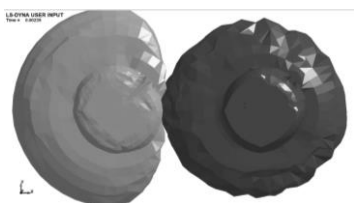


Рис. 7. Вид на ПГП в конце процесса взаимодействия

Отсутствие смыкания ПГП изображено на рис. 7, на котором видно, что левый ПГП как бы охватывает правый. С энергетической точки зрения появление горизонтальных составляющих скоростей движения среды в ПГП невыгодно, так как это не благоприятствует большей работе деформации заготовки. Однако скорости движения точек заготовки выше, чем при одиночном разряде (рис. 8). Наблюдается неравномерное движение характерных точек заготовки. При этом

максимальные скорости соответствуют точке А, находящейся на расстоянии 60 мм от центра заготовки, участок которой менее податлив, чем центральная часть. Отчасти это можно объяснить большим количеством выделяемой энергии, которая приводит к смещению центра максимального прогиба, его величина незначительна и при штамповке почти незаметна.

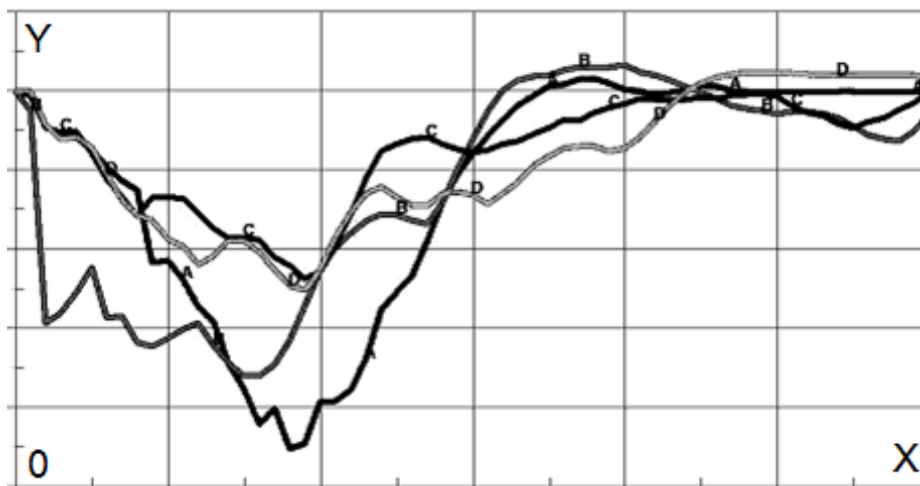


Рис. 8. Характер изменения скорости (ось Y) перемещения точек заготовки во времени (ось X):

точка А – в эпицентре левого разряда; точка В – в эпицентре центрального разряда; С – диаметрально противоположна точке А; D – на диаметре, перпендикулярном линии АВ

3. Повышению КПД процесса формообразования, т. е. растеканию ПГП в горизонтальном направлении может способствовать комбинация трех разрядов: одного основного в центре и двух боковых, симметричных относительно центрального. Моделирование такого процесса было проведено по подобной методике – выделение энергии в боковых разрядных полостях – в два этапа. Сначала в них выделялась малая доля запасенной энергии, а затем после определенного времени – основная доля энергии.

Расчет работы пластической деформации при разных значениях опережения/задержки боковых и центрального импульсов показал, что в такой зависимости существует два локальных максимума:

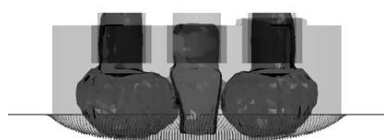
- при опережении боковыми разрядами центрального на ~ 10 мкс;
- при задержке боковых разрядов относительно центрального на ~ 300 мкс.

Оба локальных максимума практически равны по величине работе пластической деформации, но первый локальный максимум достаточно узок и его трудно реализовать практически. Второй локальный максимум достаточно пологий и временной диапазон такого максимума можно реализовать практически

Можно объяснить наличие двух максимумов. Так, при опережающем выделении энергии в двух крайних полостях и генерации при этом ударных волн, находящихся на некотором отдалении от зоны центральной полости к моменту ~ 10 мкс, сформировалось поле скоростей движения жидкости, увлекающее гидросток от центральной полости в сторону заготовки. Но этот механизм увлечения потока передачи энергии действует короткое время. Об этом свидетельствуют небольшие перемещения заготовки до момента воздействия на неё основной доли потока энергии, которая передаётся ПГП.

Локальный максимум работы пластической деформации при сдвиге разрядов ~ 300 мкс объясняется повышенным потоком энергии от трех ПГП, развившихся к этому моменту времени.

На рис. 9 показано обжатие основного (центрального) ПГП в период времени 2700 мкс, что соответствует почти полному окончанию процесса деформирования заготовки. При других значениях задержки и тем более опережения боковых разрядов не наблюдается полного обжатия центрального ПГП.



2700 мкс

Рис. 9. Формы трех ПГП:

два боковых обжимают третий при задержке боковых импульсов 300 мкс

Вместе с тем, анализ кадров 1900 мкс и 2700 мкс показывает, что к моменту времени 1900 мкс центральный ПГП обжат, но энергии в боковых ПГП ещё достаточно для их дальнейшего расширения в горизонтальном направлении. Из этого можно сделать вывод о переизбытке энергии в боковых ПГП. Следовательно, в боковых разрядных полостях можно выделять меньше энергии,

чем в центральной полости, но достаточно для обжатия центрального ПГП. Технические возможности управления выделяемой энергией присутствуют в исследуемых конструкциях ЭГ-процессов.

Переизбыток выделяемой энергии в рассматриваемом варианте подтверждается анализом соотношений кинетических энергий всей технологической системы (вещество ПГП + жидкость + заготовка) и непосредственно самой заготовки. Зависимости имеют максимумы при ~ 600 мкс и ~ 1000 мкс, после которых монотонно стремятся к нулю, что означает прекращение движения всех элементов системы. После промежутка времени 1000...1500 мкс кинетическая энергия заготовки практически нулевая, а такие составляющие технологической системы, как вещество ПГП и жидкость, продолжают обладать значительной долей своей кинетической энергии. Часть этой доли проявляется в росте поперечных размеров пузырей, что в целом для системы непродуктивно.

Кинетику поведения заготовки при задержке боковых разрядов относительно центрального демонстрируют временные зависимости скорости и перемещений ее контрольных точек (рис. 10, 11). С момента начала процесса центральная часть заготовки (точки D, E, F) начинает интенсивное движение, которое продолжается в течение 190 мкс, т. е. до начала выделения энергии в центральной разрядной полости. Это возможно только под действием ударных волн, генерируемых боковыми разрядами. Затем равномерное ускоренное

движение этого участка приостанавливается, но начинается движение периферийных участков заготовки. Впоследствии зависимость скорости от времени является немонотонно возрастающей. Ее можно назвать колебательной и скорость центральной точки достигает значений ~ 25 м/с. После достижения максимума (время $\sim 0,5 \dots 1,0$ мс) начинается замедление движения, которое тоже является колебательным. После полной остановки наблюдается отрицательное (обратное) движение с колебаниями. Предположительно они объясняются упругим последствием.

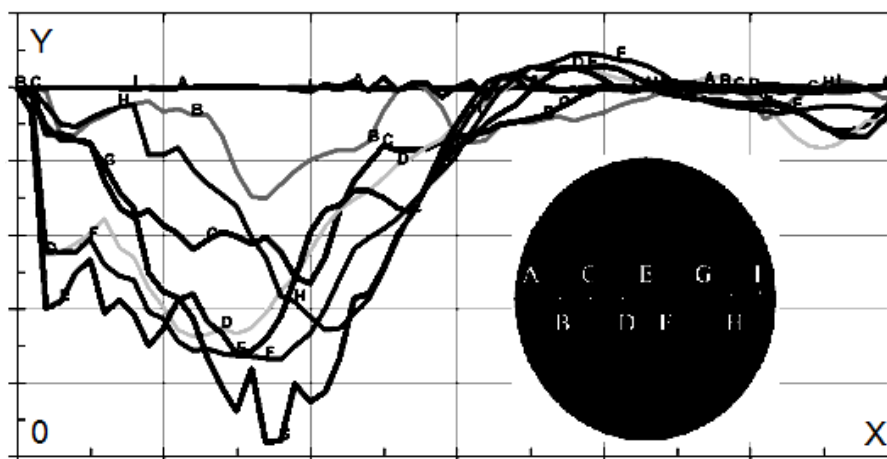


Рис. 10. Изменение скорости (ось Y) перемещений контрольных точек заготовки во времени (ось X) при тройном разряде с задержкой 300 нс

Перемещения точек заготовки во времени являются монотонными (рис. 11). Колебания скорости на этом графике не отображены, так как период колебаний скорости довольно мал (до ~ 30 нс) и в масштабах показанных временных зависимостей перемещений не виден. Обращает на себя внимание то, что максимальный прогиб наблюдается не в центре заготовки (точка E), а в эпицентрах боковых разрядных полостей (точки F и G).

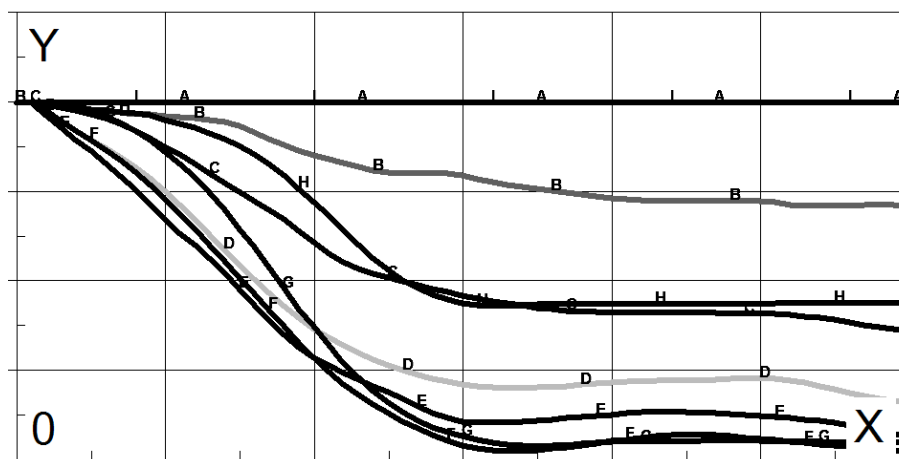


Рис. 11. Перемещение (ось Y) контрольных точек заготовки во времени (ось X) при тройном разряде с задержкой 300 нс

Формирование обжатия ПГП центрального разряда в определенном интервале времени задержки разрядов в боковых полостях вполне объяснимо. Ударные волны, генерируемые в боковых разрядных полостях и распространяющиеся с более высокой скоростью, чем скорости границ ПГП, формируют перед его головной частью благоприятное по структуре газодинамическое поле. Эти волны ускоряют движение заготовки в её центре (см. точки D, E, F на рис. 10). Отраженные от этой зоны возмущения скорее растягивающие, чем сжимающие (тормозящие). С боковых сторон на центральный ПГП действуют сжимающие силы, что приводит к вытягиванию и обжатию центрального ПГП.

При меньшем значении выделяемой энергии в боковых разрядных полостях опишем этот эффект реализации.

Из выше приведенного можно сделать вывод о том, что для более полного использования выделяемой энергии необходимо центральную разрядную полость окружить «вспомогательными» боковыми, в которых можно выделить

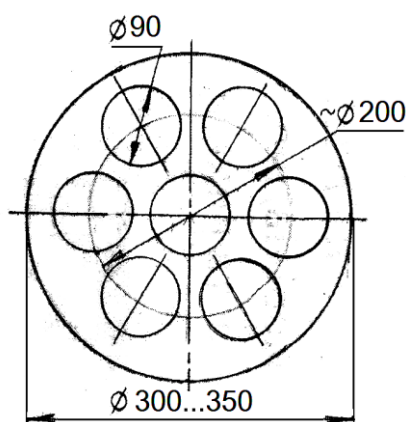


Рис. 12. Вид на торец энерговыводящей ячейки

меньшую долю энергии. Техническим воплощением такого механизма нагружения может быть энерговыводящая ячейка (розетка) для генерации в ней ЭГ-разрядов от управляемого во времени многоконтурного генератора импульсных токов из семи разрядных полостей (рис. 12)

Такую ячейку можно перемещать вдоль поверхности заготовки по соответствующей траектории для последовательного локального нагружения штампуемой заготовки.

Поле деформаций заготовки при выделении энергии в трех разрядных полостях имеет кольцеобразный вид, а изменение его параметров происходит волнообразно.

Развитие и накопление пластических деформаций, характеризующих их интенсивно-

стью \mathcal{E}_i для разных точек происходит по-разному. Для точки А, близкой к центру заготовки, и точки Е, близкой к ребру матрицы, накопление пластических деформаций происходит монотонно со средними скоростями деформации $\mathcal{E}_A = 14 \times 10^2 \text{ с}^{-1}$ и $\mathcal{E}_E = 49 \text{ с}^{-1}$. Накопление пластических деформаций в точках В, С и D происходит не монотонно, а ступенчато. Это объясняется проявлением волнообразного накопления деформаций. Средняя скорость деформации в этих точках близка к значению \mathcal{E}_E . Скорость распространения волны пластической деформации от точки А к точке В равна 240 м/с, а от точки В к точке С – 54 м/с. Эти значения передачи волны пластического возмущения значительно меньше (в 20 раз) скорости звука в алюминиевом сплаве (звуковая волна – упругое возмущение).

Выводы

1. Использование описанной численной модели процесса импульсного нагружения деформируемой тонколистовой заготовки при ЭГ-нагружении одиночным, сдвоенным и строенным разрядами в целом показало ее адекват-

ность реальному процесу и не противоречит действующим представлениям процесса, а также известному практическому опыту.

2. Наиболее энергетически эффективным является процесс из трех разрядов, при котором нагружение заготовки производится центральным разрядом, а продуктивность поддерживается боковыми разрядами. На основе исследования такой разрядной системы предложена энергетически эффективная энерговыделяющая ячейка.

3. Установлено, что при трехимпульсном нагружении штампуемой заготовки изменение её напряженно-деформируемого состояния происходит волнообразно, что соответствует существующим теоретическим представлениям, а сама форма поля деформаций имеет кольцеобразную структуру.

Список литературы

1. Тараненко, М. Е. Электрогидравлическая штамповка : теория, оборудование техпроцессы : монография в 2 ч. / М. Е. Тараненко. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». 2011. – 272 с.

2. Taranenko, M. Ye. Chapter 7 : Vibro-impulse loading – Perfectioning of metals processing with pressure [Электронный ресурс] / M. Ye. Taranenko, T. B. Bohachova, I. M. Taranenko // Modern Manufacturing Processes and Systems, Vol. 2: Fundamentals. Vrnjačka Banja (Serbia) : SaTCIP Publisher Ltd. & Belgrade (Serbia): Faculty of Information Technology and Engineering (FITI), 2020, pp. 151–176. – Режим доступа : <https://plus.sr.cobiss.net/opac7/bib/30012937#full>

3. Старков, Н. В. Экспериментальное исследование импульсной электрогидравлической калибровки листовых деталей из высокопрочной стали / Н. В. Старков, Л. И. Стрелковская // Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 79 – 83.

4. Нарыжный, А. Г. Вычислительная модель электрогидравлического эффекта / А. Г. Нарыжный // Открытые информационные и компьютерные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 54. – Харьков, 2012. – С. 112 – 124.

5. Нарыжный, А. Г. Исследование процесса последовательного деформирования листовой заготовки при электрогидравлическом нагружении / А. Г. Нарыжный, М. Е. Тараненко // Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Інноваційні технології і обладнання для обробки матеріалів в машиностроєнні і металургії. – Харьков : НТУ «ХПІ», 2019. – № 26 (1351). – С. 21 – 27.

6. Нарыжный, А. Г. Механические процессы в системе с погружной электроразрядной камерой / А. Г. Нарыжный, М. Е. Тараненко // Обработка металлов давлением : сб. науч. тр. ДГМА. – Краматорск : ДГМА, 2019. – № 2 (49). – С. 136 – 142.

7. Штамповка взрывом. Основы теории / под ред. М. А. Анучина. – М. : Машиностроение, 1972. – 152 с.

References

1. Taranenko, M. E. *Jelektrogidravlicheskaja shtampovka : teorija, oborudovanie tehprocessy : monografija v 2 ch.* / M. E. Taranenko. – Kharkiv. : Nac. arokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «HAI». 2011. – 272 p.

2. Taranenko, M. Ye. Chapter 7: Vibro-impulse loading – Perfectioning of metals processing with pressure [Elektronnyiy resurs] / M. Ye. Taranenko, T. B. Bohachova, I. M. Taranenko // *Modern Manufacturing Processes and Systems, Vol. 2: Fundamentals*. Vrnjačka Banja (Serbia): SaTCIP Publisher Ltd. & Belgrade (Serbia): Faculty of Information Technology and Engineering (FITI), 2020, – pp. 151–176. Rezhim dostupa: <https://plus.sr.cobiss.net/opac7/bib/30012937#full>

3. Starkov, N. V. Jeksperimental'noe issledovanie impul'snoj jelektrogidravlicheskoj kalibrovki listovyh detalej iz vysokoprochnoj stali / N. V. Starkov, L. I. Strelkovskaja // *Visnyk NTU «KhPI»*. Ser. *Tekhnika ta elektrofizyka vysokykh napruh*. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2017. – no. 38 (1260). – pp. 79 – 83.

4. Naryzhnyj, A. G. Vychislitel'naja model' jelektrogidravlicheskogo jeffekta / A. G. Naryzhnyj // *Otkrytye informacionnye i komp'juternye tehnologii : sb. nauch. tr.: Nac. ajerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «HAI»*,. vol. 54. – Kharkiv, 2012. – pp. 112 – 124.

5. Naryzhnyj, A. G. Issledovanie processa posledovatel'nogo deformirovanija listovoj zagotovki pri jelektrogidravlicheskom nagruzhenii / A. G. Naryzhnyj, M. E. Taranenko // *Visnik NTU «HPI»*. Ser. *Innovacionnye tehnologii i oborudovanie dlja obrabotki materialov v mashinostroenii i metallurgii*. – Kharkiv : NTU «HPI», 2019.– no. 26 (1351). – pp. 21 – 27.

6. Naryzhnyj, A. G. Mehanicheskie processy v sisteme s pogruzhnoj jelektrozrazjadnoj kameroy / A. G. Naryzhnyj, M. E. Taranenko // *Obrabotka metal lov davlenim : sb. nauch. tr. DGMA*. – Kramatorsk : DGMA, 2019.– № 2 (49). – pp. 136 – 142.

7. *Shtampovka vzryvom. Osnovy teorii* : pod red. M. A. Anuchina. – Moskva : Mashinostroenie, 1972. – 152 p.

Надійшла до редакції 30.04.2021, розглянута на редколегії 00.00.2021

Моделювання процесу взаємодії імпульсного струменя із заготовкою при електрогідравлічному навантаженні

ЕГ-штампування тонколистових великогабаритних деталей показало свою техніко-економічну ефективність, в тому числі можливість отримувати деталі надвисокої точності. При цьому заготовку навантажують на ЕГ-пресах великої енергії, що запасається (до 500 кДж). Преси мають змогу просторово-часово керувати навантаженням, що здійснюється за допомогою багатоконтурних розрядних блоків, в яких в одне ціле об'єднано десятки розрядних порожнин. Керованими параметрами можуть бути електричні параметри десятків розрядних контурів генератора імпульсів струму, обсяг і крок розташування розрядних порожнин, їх висота до заготовки, а також послідовність розрядів у часі (одночасне або із зсувом у часі ЕГ-розрядів у сусідніх розрядних порожнинах). Вибір раціональних діапазонів цих параметрів є неможливим без числового моделювання процесів, що відбуваються в розрядному обсязі всього блока.

При моделюванні комплексно розглядалися процеси виділення теплової потужності при ЕГ-розряді, утворення і поширення парогазового пузиря, генеруючого затоплену струмінь рідини, і деформування податливої заготовки при впливі на неї такого струменя.

Викладено результати числових експериментів у середовищі LS-DYNA з використанням методу ALE при ЕГ-розряді в одиночній розрядній (заглибній) камері, в двох і трьох сусідніх при різних варіюваних умовах: відстані від зони

розряду до заготовки (дистанції розряду) і зміщенні в часі двох і трьох розрядів у сусідніх розрядних порожнинах. Як порівнювальні параметри були вибрані: переміщення точок заготовки та їх швидкості, розподіл деформацій по поверхні заготовки і робота деформації. Показано адекватність моделі реальному процесу. Запропоновано енергетично ефективну енерговиділяючу комірку для генерації ЕГ-розрядів від керованого за часом багатоконтурного генератора імпульсних струмів.

Ключові слова: електрогідролічний розряд, розрядна порожнина, заготовка, ударні хвилі, гідропотік, парогазовий пузир, швидкість, інтенсивність пластичних деформацій, робота деформації

Modeling the process of interaction of pulsed jet with blank by electro-hydraulic loading

The eg-stamping of thin-leaf-sized parts has shown its technical and economic efficiency, including the ability to receive parts of ultrahigh-accuracy. At the same time, the workpieces are loaded on the eg-presses of large intensive energy (up to 500 kJ), which have the possibility of space-time loading control. Such management is carried out using multi-terminated discharge blocks in which dozens of discharge cavities are combined into one. The controlled parameters can be the electrical parameters of tens of discharge circuits of the current pulse generator, the volume and step of the arrangement of the discharge cavities, their height to the workpiece, as well as the sequence of discharges in time (simultaneous or with a shift in the time of EG-discharges in adjacent discharge cavities). The choice of rational ranges of these parameters is impossible without numerical simulation of processes occurring in the discharge volume of the entire block.

In the simulation, the processes of heat power is comprehensively considered with the EG-discharge, the formation and propagation of the vapor-gas bubble, which generates a flooded stream of liquid, and deforming the supple billet when exposed to such a jet.

The results of numerical experiments in the LS-DYNA environment using the ALE method with the EG-discharge in a single bit (submersible) chamber, in two and three neighboring conditions with different variable conditions are set: the distance from the discharge zone to the workpiece (discharge distance) and the displacement of the time of two and three discharges in the adjacent discharges. As compared parameters were selected: movement of the billet and their speed, the distribution of deformations on the surface of the workpiece and the work of deformation. The adequacy of the model of the real process is shown. An energy-efficient energy-generating cell is proposed for generating EG-discharges from a multi-mounted pulse current generator.

Key words: electrohydraulic discharge, discharge cavity, blank, impact wave, hydro-stream, stem-gas cavity, rate, plastic strain intensity, work of deformation

Сведения об авторах:

Михаил Евгеньевич Тараненко: доктор технических наук, профессор кафедры 107 автомобилей и транспортной инфраструктуры, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», . Харьков, тел.: (057) 788-41-70, e-mail: m.taranenko@khai.edu

Александр Георгиевич Нарыжный: кандидат технических наук, доцент кафедры 202 теоретической механики, механоведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, тел. (050)040-297-50, e-mail: o.naryzhniy@khai.edu

About the Authors

Mykhaylo Ye. Taranenko – Full Professor, National Aerospace University “Kharkiv aviation institute” named after N. Ye. Zhukovsky, Kharkiv, tel.: (057) 788-41-70, e-mail: m.taranenko@khai.edu, ORCID: 000-0003-4126-0979

Naryzny Aleksandr G. – candidate of engineering sciences, associate professor of Department of Theoretical Mechanics, Mechanical Engineering and Robotomechanical Systems, National Aerospace University “Kharkiv aviation institute” named after N. Ye. Zhukovsky, Kharkiv, tel.: (050)040-297-50, e-mail: o.naryzhniy@khai.edu, ORCID: 0000-0002-5379-1964