

Экспериментальное исследование и численное моделирование метания алюминиевого образца для магнитно-импульсной сварки

© А.Г. Анисимов, М.Э. Ахмед Солиман

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, 630090, Россия

Метод индукционного ускорения проводящих дисков достаточно широко применяется в ударных экспериментах. В работе представлены экспериментальное исследование и численное моделирование магнитно-импульсного метания тонких плоских дисков из алюминиевого сплава Д16АМ. При этом использованы плоская медная катушка и конденсаторный источник энергии для изучения возможности проведения магнитно-импульсной сварки. Высокоэнергетический импульсный метод является эффективным и безопасным. Точное дозирование мощности импульсного разряда возможно путем изменения емкости конденсатора (накопителя) и напряжения, однако разогрев заготовки индуцированными токами может привести к повышению ее пластичности. Численное моделирование проведено с помощью программного обеспечения LS-DYNA для анализа конечных элементов. Полученные результаты выявили существенный недостаток использования данной схемы ускорения — трудно обеспечить плоскую форму метаемого образца.

Ключевые слова: ускорение диска магнитным полем, сварка металлов, скин-слой, угол изгиба пластины при метании

Введение. Сварка при высокоскоростном косом соударении металлических пластин, реализованная с использованием в качестве источника энергии взрывчатых веществ, получила название «сварка взрывом». За время проведения исследований сварки взрывом в ИГиЛ СО РАН (с 1961 г.) накоплен большой опыт в этой области [1]. Идея применять сильное магнитное поле для ускорения пластин появилась достаточно давно. В настоящее время этот способ сварки, получивший название «магнитно-импульсная сварка» (МИС), широко применяется в промышленности в основном для сварки образцов с цилиндрической геометрией. Для плоских образцов область сварки ограничена узкими полосами площадью в несколько десятков квадратных миллиметров. В работах [2–4] была предложена и реализована МИС, в которой плоский тонкий диск метался с помощью индукционной катушки на плоскую мишень, расположенную под определенным углом. Однако размеры зоны сварки не были указаны. Такая схема не вызвала интереса и не получила распространения.

Цель настоящей работы — исследование возможности увеличения площади сварки плоских образцов с использованием индукционного метания тонкого плоского диска.

Условия сварки при соударении пластин. Анализ большого количества экспериментальных данных по сварке взрывом позволяет сделать вывод о том, что область «окно сварки» определяется двумя величинами: углом соударения пластин и скоростью точки контакта пластин при соударении [1, 5].

Для того чтобы получить прочную сварку при соударении двух пластин, необходимо обеспечить следующие условия: угол соударения пластин должен находиться в диапазоне $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$, а скорость точки контакта должна быть в диапазоне $v_1 < v_k < c^*$, где c^* — скорость звука в свариваемом металле. Граничные значения α_1, α_2 зависят от свойств конкретных свариваемых материалов, минимальные значения угла соударения $\alpha_1 \approx 6...10^\circ$, $\alpha_2 \approx 20^\circ$, минимальная скорость точки контакта $v_{\min} \geq 900$ м/с. Следовательно, для выполнения магнитно-импульсной сварки необходимо ускорить пластину до 300...400 м/с, сохранив при этом ее плоскую форму.

Экспериментальная установка. Эксперименты и численное моделирование по индукционному ускорению тонких дисков были выполнены по схеме, изображенной на рис. 1 [4, 6]. Разряд конденсаторной батареи C на катушку индуктивности приводит к появлению в метаемой пластине (диске) индуцированных токов и появлению силы Ампера, ускоряющей лейнер. Затем происходит соударение с неподвижной пластиной-мишенью. Для получения необходимого угла соударения пластин задается начальный угол α_0 .

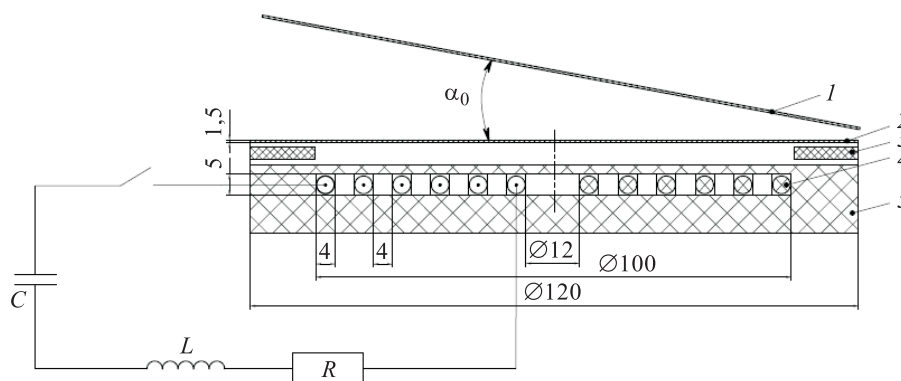


Рис. 1. Экспериментальная схема ускорения алюминиевых пластин:
 1 — пластина-мишень; 2 — метаемая пластина; 3 — изоляционная пластина;
 4 — спиральная катушка; 5 — корпус индуктора

Расчетная схема процесса метания. Метод пластического формирования материалов с высокоскоростными деформациями основан на электромагнитном импульсном взаимодействии. Параметры

электромагнитных полей определяются методом конечных элементов (МКЭ) для твердых проводников в сочетании с методом граничных элементов (МГЭ) для окружающего воздуха/изоляторов, который, таким образом, не нуждается в построении сетки. Оба метода используют элементы, основанные на дискретных дифференциальных формах для повышения точности. Электромагнитный модуль позволяет рассчитать распределение токов и магнитных полей вокруг катушки. Возникающая сила Ампера ускоряет и деформирует заготовку. Схема взаимодействия между электромагнитным, тепловым и механическим решателями, реализуемая с помощью программы LS-DYNA [7, 8], представлена на рис. 2.

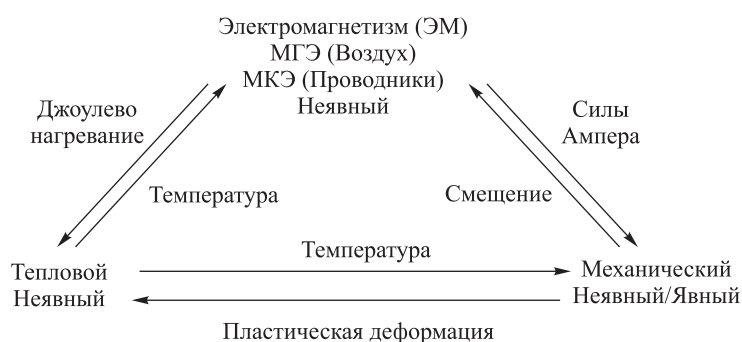


Рис. 2. Схема взаимодействия между электромагнитным, тепловым и механическим решателями

Результаты. График изменения силы тока в эксперименте, который совпал с полученным при моделировании, приведен на рис. 3. Значение первого максимума составляет 102,5 кА. Рассчитанная по модели зависимость тока от времени отличается от экспериментальной не более чем на 3 %.

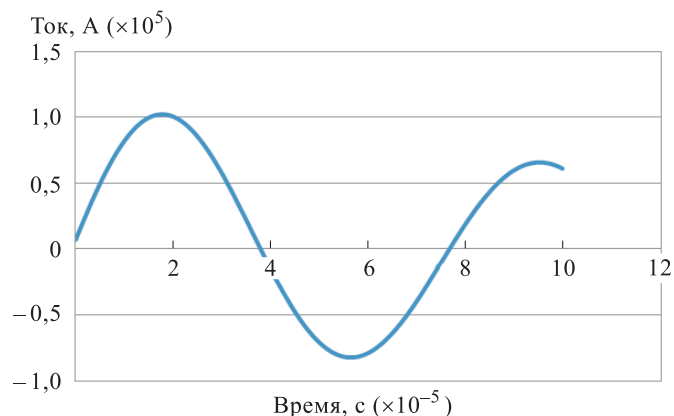


Рис. 3. Экспериментальный график изменения силы тока I ($U = 4,0$ кВ, $C = 200$ мкФ, диск толщиной 1 мм из алюминиевого сплава Д16АМ)

При проведении эксперимента использовали батарею конденсаторов с накопителем емкостью $C = 200 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$, напряжением $U = 7,5 \text{ кВ}$, собственной индуктивностью $L_0 = 30 \text{ нГн}$ и энергией $W < 5,6 \text{ кДж}$.

Метаемая пластина после эксперимента не сохранила плоской формы (рис. 4, а), так как ее края ускорялись быстрее, чем центральная часть. Пластина очень похожей формы получалась и при моделировании ускорения (рис. 4, б).

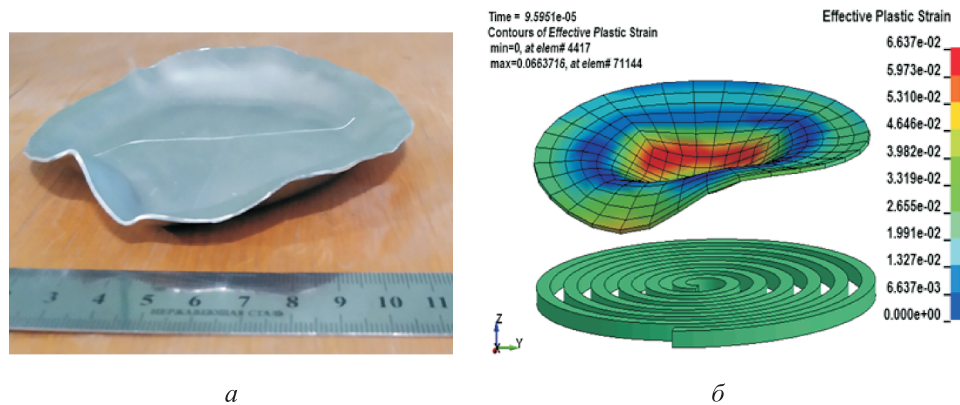


Рис. 4. Пластические деформации метаемой пластины: а — метаемый диск после эксперимента ($U = 4 \text{ кВ}$); б — трехмерная математическая модель

Этот же эффект отставания центральной части лейнера хорошо виден на рис. 5, на котором представлены сечения метаемого лейнера вертикальной плоскостью в разные моменты времени. Для того чтобы выяснить причины такого явления, были проанализированы распределение плотности индуцированного тока в лейнере и распределение силы Ампера по радиусу, для чего были выбраны контрольные элементы А, В, С, D для анализа их скорости при метании.

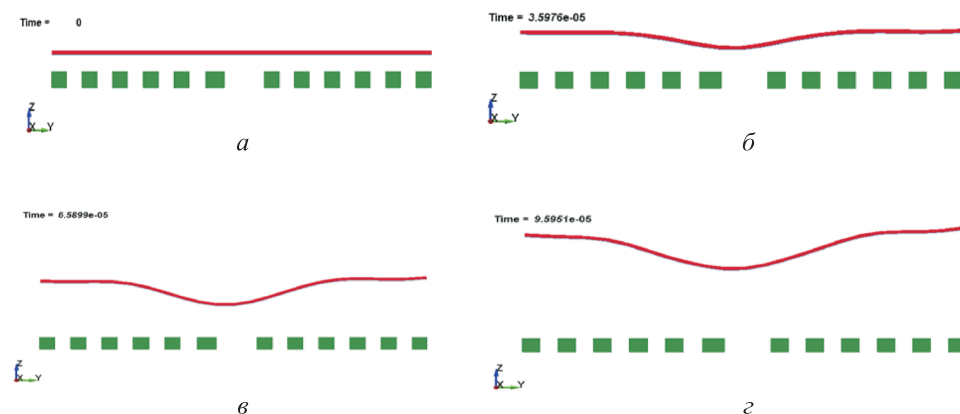


Рис. 5. Метание лейнера на этапах времени 0 мкс (а), 36 мкс (б), 66 мкс (в), 96 мкс (г)

Пластина-лейнер с разбиением на конечные элементы, на которой выбраны контрольные элементы А, В, С, D для анализа плотности тока и их скорости при метании, предоставлена на рис. 6.

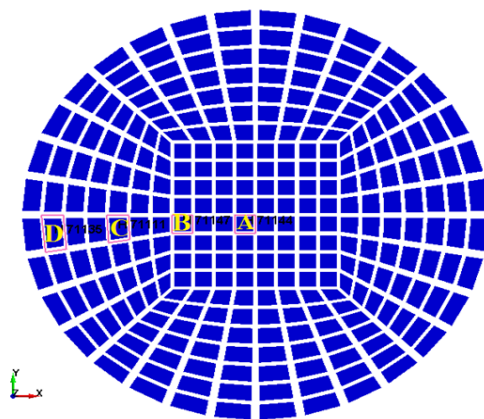


Рис. 6. Схема разбиения лейнера на конечные элементы (A7144, B71147; C71111; D71135)

График изменения скорости метания во времени для четырех контрольных элементов приведен на рис. 7. Следует отметить, что максимальная скорость метания составляет 434 м/с для элемента D; 355 м/с — для элемента C; 351 м/с — для элемента В и 344 м/с — для элемента А. Таким образом, скорость метания выше на краю диска, а в центральной части отстает.

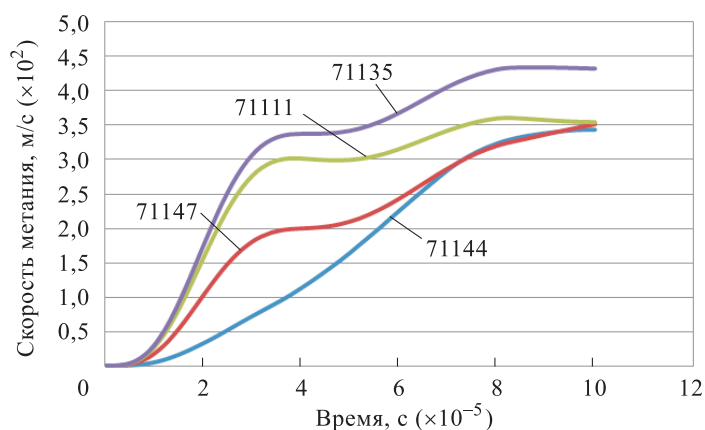


Рис. 7. Скорость метания четырех элементов

Максимальный угол изгиба пластины при метании ($\alpha = 52,7^\circ$) представлен на рис. 8.

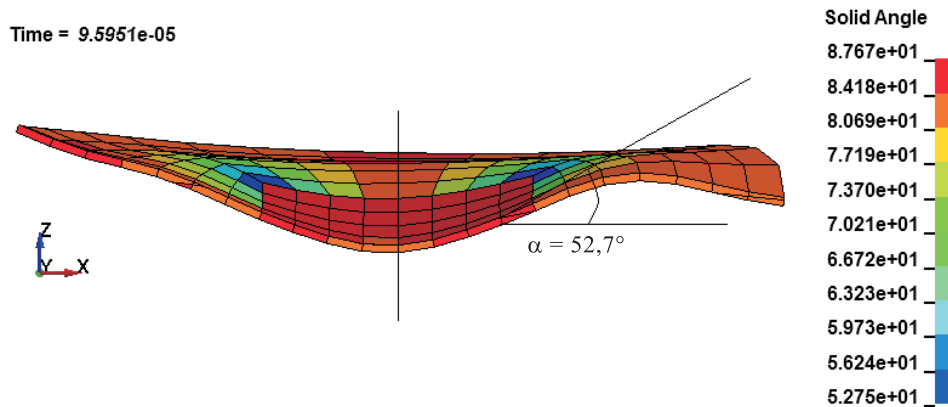


Рис. 8. Максимальный угол изгиба пластины α при метании

График изменения угла изгиба пластины в зависимости от скорости ее метания представлен на рис. 9. При максимальной скорости метания пластины, равной 434 м/с, угол изгиба достигает максимального значения — $52,7^\circ$, где и располагается наиболее деформированная сторона пластины.

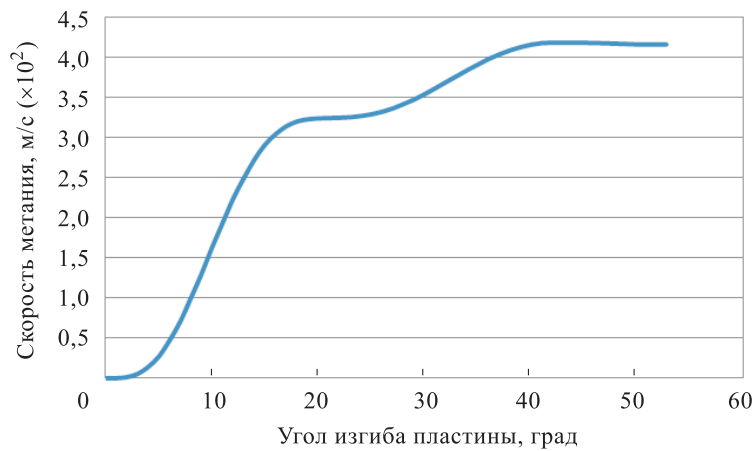


Рис. 9. Зависимость между скоростью метания v и углом изгиба пластины α

График азимутальной плотности тока в зависимости от расстояния до центра катушки в разные моменты времени изображен на рис. 10.

График изменения действующей на площадь контрольных элементов А, В, С, D силы Ампера, которая зависит не только от параметров магнитного поля, но и от площади контрольных элементов, приведен на рис. 11. Поэтому значения силы Ампера целесообразно представить отнесенными к площади соответствующих контрольных элементов F_A / S .

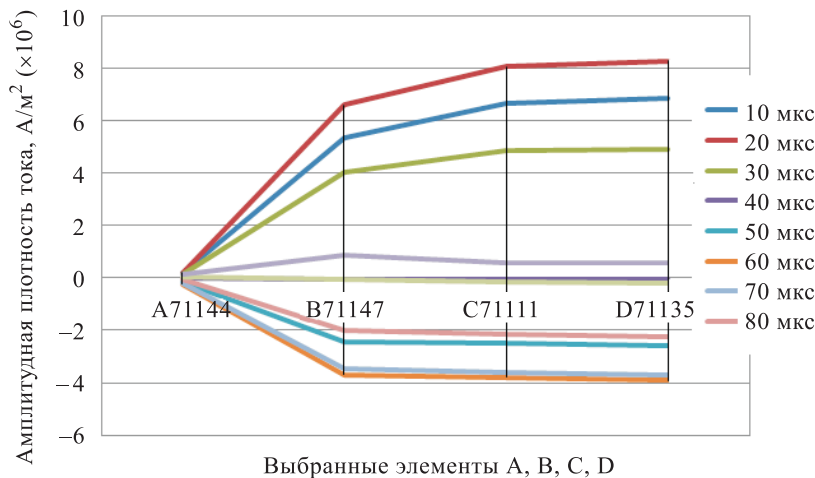


Рис. 10. Зависимость азимутальной плотности тока от расстояния до центра катушки в разные моменты времени

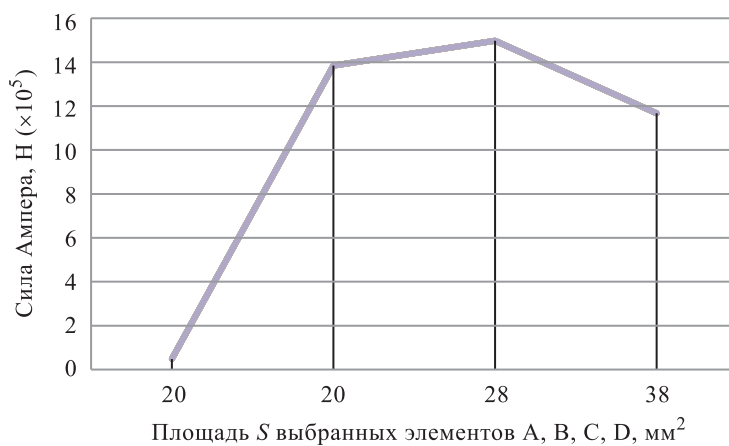


Рис. 11. Изменение силы Ампера, действующей на площадь S контрольных элементов А, В, С, D

Следует отметить, что максимальное значение силы Ампера, сосредоточенное на площади элемента С, составляет 1497,6 кН. На площади элемента В значение силы Ампера равно 1384 кН, на площади элемента D оно уменьшается до 1167 кН, а на площади элемента А сила Ампера незначительная — 48 кН.

Обсуждение результатов. В [9, 10] были представлены результаты исследования метания металлических пластин до скоростей 1 км/с, но в этих работах рассчитывали суммарную силу, ускоряющую проводник. Задача сохранения плоской формы не рассматривалась.

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о том, что пластина диаметром 100 мм и толщиной 1 мм при метании теряет

устойчивость вследствие воздействия большей силы Ампера на периферии заготовки. Искривление лейнера в процессе разгона изменяет угол соударения, в связи с чем значительная часть пластины оказывается вне зоны окна сварки, и поэтому возможна сварка только части лейнера. Чтобы уменьшить отмеченные негативные эффекты, изменяли параметры катушки (плотность витков), но это мало уменьшило влияние на отставание центральной части лейнера. Кроме того, увеличивали толщину лейнера (или отношение толщины к диаметру), что приводило к возрастанию его массы, в связи с чем для достижения необходимой скорости соударения требовалось увеличивать энергию источника. Расчеты показали, что рассматриваемым способом удастся ускорить метание плоских лейнеров достаточно малой площади.

Заключение. Результаты рассмотренного исследования позволяют сделать следующие выводы.

Проведенные эксперименты по магнитно-импульсному ускорению алюминиевых лейнеров до скоростей, необходимых для выполнения сварки при соударении, показали, что не удастся ускорить алюминиевый диск толщиной 1...1,5 мм и диаметром 100 мм без нарушения плоской формы.

Выполненное численное моделирование процесса ускорения позволило получить хорошее совпадение численных и экспериментальных значений силы тока в цепи и скорости лейнера. Наблюдается качественное совпадение формы лейнера, полученной в ходе эксперимента и в результате численного моделирования, — в обоих случаях края диска ускоряются быстрее, чем центральная часть.

Анализ результатов численного расчета электродинамических величин показал, что в процессе разгона азимутальная плотность тока и сила Ампера распределены в ускоряемом диске неравномерно — по радиусу увеличиваются на краю диска и уменьшаются к его центру, что приводит к неравномерному ускорению и не дает возможности обеспечить условия сварки на всей площади диска.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дерibas А.А. *Физика упрочнения и сварки взрывом*. Новосибирск, Наука, Сиб. отд., 1972, 188 с.
- [2] Кузьмин Г.Е. О метании пластин в условиях сварки взрывом. *Динамика сплошной среды: сб. науч. тр. Вып. 29*. Новосибирск, АН СССР. Сиб. отд., Ин-т гидродинамики, 1977, с. 137–142.
- [3] Vacek J. The acceleration of metal plates packing an explosive charge on both sides. *Proc. of the Int. Symp. of Explosive Working of Materials*, Marianske Lazne, CSSR, 1970, pp. 79–91.
- [4] Дудин А.А. *Магнитно-импульсная сварка металлов*. Москва, Металлургия, 1979, 128 с.

- [5] Анисимов А.Г., Мали В.И. Особенности метания пластин в условиях магнитно-импульсной сварки. *Физика горения и взрыва*, 2018, т. 54, № 1, с. 125–131.
- [6] Anisimov A.G., Mali V.I. *Magnetic pulse welding of different metal sheets. Japan — Russia Joint Seminar “Advanced Material Synthesis Process and Nanostructure”*. Sendai, 2018.
- [7] Ахмед Солиман М.Э. Формообразование вытяжки в глухой и открытой матрицах магнитно-импульсным давлением. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением = Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, 2021, № 10, с. 3–11.
- [8] Oliveira D.A., Workswick M.J., Finn M., Newman D. Electromagnetic forming of aluminum alloy sheet: free-form and cavity fill experiments and model. *J. Mater. Process Technol.*, 2005, vol. 170, pp. 350–362.
- [9] Федоров С.В., Ладов С.В. Расчетный анализ электромагнитного метания металлических пластин для систем защиты объектов. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2000, вып. 4 (66), с. 69–78.
- [10] Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В., Кружков В.А., Щербаков А.В. Метание металлических пластин импульсным магнитным полем. *Оборонная техника*, 1999, № 1-2, с. 34–39.

Статья поступила в редакцию 25.01.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Анисимов А.Г., Ахмед Солиман М.Э. Экспериментальное исследование и численное моделирование метания алюминиевого образца для магнитно-импульсной сварки. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 3.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-3-2160>

Анисимов Александр Георгиевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории синтеза композиционных материалов, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН; автор более 90 научных работ в области магнитно-импульсной сварки, сварки взрывом, механики жидкости, газа и плазмы. e-mail: anis@hydro.nsc.ru

Ахмед Солиман Мохамед Шериф Эль Сайед — младший научный сотрудник лаборатории синтеза композиционных материалов, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН; автора более 20 научных работ в области магнитно-импульсной штамповки. e-mail: ahmedsoliman@hydro.nsc.ru

Experimental investigation and numerical simulation of accelerating an aluminium sample for magnetic pulse welding

© A.G. Anisimov, M.E. Ahmed Soliman

Lavrentiev Institute of Hydrodynamics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, 630090, Russia

The induction acceleration method is quite widely used in impact experiments with conductive disks. The paper presents an experimental study and numerical simulation concerning magnetic pulse acceleration of thin flat discs made of D16AM aluminium alloy. We used a flat copper coil and a capacitor power source to investigate magnetic pulse welding possibilities. The high-energy pulse method is efficient, safe, capable of precisely setting pulse discharge power by varying the capacitor (energy storage) capacitance and voltage, while heating the work piece with induced current can lead to an increase in its plasticity. We used the LS-DYNA finite element analysis software package to run our numerical simulation. The results obtained show that there is a significant disadvantage to using this acceleration setup: it is difficult to ensure that the sample accelerated remains planar.

Keywords: disk acceleration in magnetic field, metal welding, skin depth, acceleration-driven plate buckling angle

REFERENCES

- [1] Deribas A.A. *Fizika uprochneniya i svarki vzryvom* [Physics of explosion hardening and welding]. Novosibirsk, Nauka Publ., Siberian Branch, 1972, 188 p.
- [2] Kuzmin G.E. O metanii plastin v usloviyah svarki vzryvom [On plate acceleration in explosion welding]. *Dinamika sploshnoy sredy: sb. nauch. tr.* [Continuum dynamics: proc.]. No. 29. Novosibirsk, Academy of Sciences of the USSR, Siberian Branch, Institute of Hydrodynamics, 1977, pp. 137–142.
- [3] Vacek J. The acceleration of metal plates packing an explosive charge on both sides. *Proc. of the Int. Symp. of Explosive Working of Materials*. Marianske Lazne, CSSR, 1970, pp. 79–91.
- [4] Dudin A.A. *Magnitno-impulsnaya svarka metallov* [Magnetic pulse welding of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979, 128 p.
- [5] Anisimov A.G., Mali V.I. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 125–131.
- [6] Anisimov A.G., Mali V.I. Magnetic pulse welding of different metal sheets. *Japan — Russia Joint Seminar “Advanced Material Synthesis Process and Nanostructure”*. Sendai, 2018.
- [7] Ahmed Soliman M.E. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem — Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, 2021, no. 10, pp. 3–11.
- [8] Oliveira D.A., Workswick M.J., Finn M., Newman D. *J. Mater. Process Technol.*, 2005, vol. 170, pp. 350–362.
- [9] Fedorov S.V., Ladov S.V. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk — Proceedings of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences*, 2000, no. 4 (66), pp. 69–78.

- [10] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V., KruzHKov V.A., Shcherbakov A.V. *Oboronnaya tekhnika — Defence technology*, 1999, no. 1-2, pp. 34–39.

Anisimov A.G., Cand. Sc. (Phys. Math.), Senior Research Fellow, Laboratory of Composite Material Synthesis, Lavrentiev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; author has more than 90 scientific publications in the field of magnetic pulse welding, explosion welding, fluid, gas and plasma mechanics.
e-mail: anis@hydro.nsc.ru

Ahmed Soliman M.E., Research Assistant, Laboratory of Composite Material Synthesis, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; author has more than 20 scientific publications in the field of magnetic pulse forming.
e-mail: ahmedsoliman@hydro.nsc.ru