

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СВАРКИ (Обзор)

М. А. ПОЛЕЩУК, канд. техн. наук, **И. В. МАТВЕЕВ**, **В. А. БОВКУН**, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены основные направления исследований магнитно-импульсной сварки. Дана оценка свариваемости комбинированных соединений, выполненных этим способом, а также области его применения.

Ключевые слова: магнитно-импульсная сварка, направления исследований, трубчатые изделия, оборудование, свариваемость материалов, области применения магнитно-импульсной сварки

В промышленности магнитно-импульсная сварка (МИС) применяется на протяжении нескольких десятков лет и требуется определить ее место в современном промышленном производстве, оценить тенденции реализации.

Для качественной оценки тенденции (тренда) научно-практической активности исследований и применения МИС на современном этапе был проведен мониторинг динамики публикаций (преимущественно электронных) с выборкой по годам и фильтрацией по ключевому словосочетанию в тексте. При этом использовали такие современные поисковые системы, как PdfQueen, FreePatentsOnline, Google-Scholar (Google Академия), Scirus, 2dix, PdfSearch и др. (рис. 1).

В качестве основной поисковой системы использовали Google Scholar, имеющую функцию отбора по годам и фильтрацию по точному словосочетанию. Следует отметить, что многие компании не склонны размещать в открытых источниках данные о производственно-технологических особенностях выпуска своей продукции, в том числе и об использовании МИС, что затрудняет поисковую работу в этом направлении, заставляет проводить анализ косвенными методами и полагаться на мнение экспертов.

Теоретическими вопросами МИС занимаются во многих образовательных центрах развитых стран (University of Waterloo, Technische Universitat Dortmund, Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS, Ohio State University, Wuhan University of Technology, Osaka University, Tokyo Metropolitan College of Technology, Belgian Welding Institute и др.) [1–6], а в плане промышленной разработки и внедрения — научные группы при большинстве ведущих автомобилестроительных и авиакосмических компаний (PST,

DANA, PULSAR, MAXWELL MAGNEFORM и др.).

В странах СНГ исследования теории и практического применения МИС ведутся уже на протяжении десятков лет, сразу после изобретения ее в СССР [7–9]. На фоне роста публикаций по этой теме их абсолютное количество относительно невелико, еще меньше публикаций о практическом применении МИС. Очевидно, это связано с общим состоянием экономики и промышленного производства в этих странах.

Основными центрами научно-практической активности в области магнитно-импульсной обработки металлов и МИС в странах СНГ являются ИЭС им. Е. О. Патона, Харьковский политехнический институт, ГКНПЦ им. М. В. Хруничева, Донской политехнический институт, Самарский государственный аэрокосмический университет совместно с Самарским центром МИОМ и др.

В мировой практике МИС в основном используется при соединении трубчатых деталей. Сварка листовых изделий пока находится преимущественно на стадии исследовательских проработок.

При всей надежности современного оборудования для МИС (индукторы выдерживают до 2 млн импульсов) и его высокой производитель-

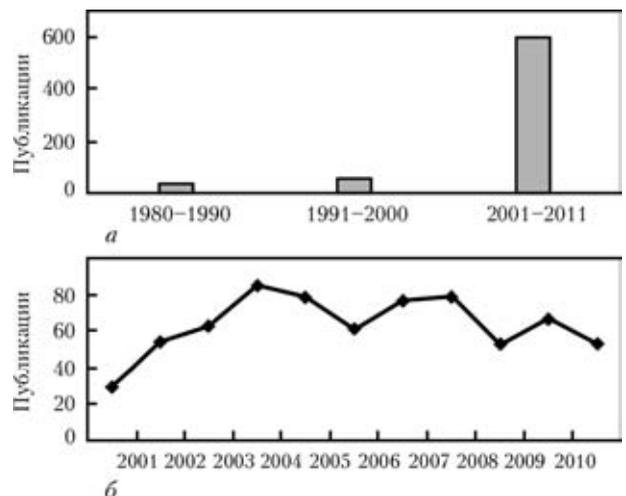


Рис. 1. Динамика публикаций в 1980–2011 (а) и 2000–2011 (б) гг.



ности (минимум шесть сварочных импульсов в минуту; ограничение — длительность операции загрузки/выгрузки детали) основным препятствием внедрению МИС, очевидно, является относительная дороговизна оборудования: начальная цена малой установки составляет от 100 тыс. дол. США.

Другим ограничением является необходимость применения повышенных мер безопасности (высокое напряжение, сильные магнитные поля, опасность разрушения индуктора), которые к тому же требуют значительных капиталовложений. Впрочем, при роботизации и автоматизации процесса эта проблема может быть сведена к абсолютному минимуму [10].

Вероятно, в обозримом будущем по мере прогресса в области импульсных накопителей электрической энергии (в данном случае специальных высоковольтных импульсных конденсаторов) и удешевления их производства (их цена составляет более половины стоимости всего оборудования МИС) МИС станет доступнее. Это вполне возможно, поскольку в настоящий момент значительные научно-практические и финансовые ресурсы сосредоточены в прикладной физике и в ВПК — создание мобильных систем электромагнитного поражения, мобильных электромагнитных пушек (рельсотронов) и лазеров, где одним из основных энергетических компонентов являются высоковольтные импульсные конденсаторные накопители. Очевидно, поэтому в гражданских сферах промышленности вскоре появятся более эффективные конденсаторные системы, что позволит соз-

давать доступные стационарные и даже мобильные системы МИС.

В настоящее время в промышленности с помощью МИС выполняются такие соединения: алюминий–алюминий, алюминий–медь, алюминий–магний, алюминий–титан, медь–медь, медь–сталь, медь–бронза, никель–титан, никель–никель, сталь–сталь. Для трубчатых деталей рекомендуется таблица свариваемости, приведенная в работе [11].

Практическим применением МИС интересуются прежде всего автомобильные компании. По этой причине независимые фирмы по разработке и внедрению магнитно-импульсной техники и технологии (DANA, PULSAR, PST, MAGNEFORM и др.) ориентируют большинство своих разработок на этот сектор. Соответственно и производители оборудования МИС значительную часть своей прибыли получают именно от автомобилестроительного сектора производства.

Производственников здесь привлекают прежде всего возможность сварки разнородных металлов, а также простота ее процесса, высокая степень автоматизации, отсутствие термических деформаций, хорошее качество сварки и повторяемость результатов, исключение операций очистки и применения расходных материалов (сварочная проволока, газы), отсутствие необходимости в локальной вытяжной вентиляции, поскольку нет вредных выбросов, очень низкий процент брака и пр. [12].

Применение МИС в сравнении с другими технологиями в автомобилестроении пока относительно невелико, но имеет постоянную тенденцию

Таблица свариваемости трубчатых деталей при способе МИС

Внешняя труба	Внутренняя труба												
	Al серии 1000	Al серии 3000	Al серии 5000	Al серии 6000	Al серии 7000	Алюминий литейный	Медь	Бронза	Сталь черная	Сталь нержавеющая	Никель	Магний	Титан
Al серии 1000	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-
Al серии 3000	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
Al серии 5000	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-
Al серии 6000	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-
Al серии 7000	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
Алюминий литейный	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Медь	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-
Бронза	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-
Сталь черная	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-
Сталь нержавеющая	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-
Никель	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-	+

Примечание. Здесь «+» обозначает свариваемость комбинации материалов, «-» — ее отсутствие.



Рис. 2. Установка МИС на заводе «Spicer Driveshaft»

к росту. Эксперты утверждают, что потенциал МИС значителен и в ближайшие годы предвидится реальное массовое развертывание [13].

Корпорация «DANA» («Dana Holding Corp.») в отличие от «чистых» компаний-разработчиков (PULSAR, PST и др.) создает технологию и оборудование для МИС в основном для собственных нужд (она является крупнейшим изготовителем и поставщиком узлов и деталей на автомобильный рынок). Одно из шести ее подразделений («Spicer Driveshaft») специализируется на изготовлении трансмиссионных валов, в том числе и с помощью МИС (рис. 2). По оценкам специалистов «DANA», широкое внедрение МИС позволит создавать облегченные рамы и другие элементы автомобильных конструкций из разнородных металлов, что приведет к снижению массы на 70 % и сокращению потребления топлива на 10 %. Это повлечет за собой уменьшение вредных выбросов в окружающую среду, в том числе и при производстве самих автомобилей («зеленая технология») [14].

Знаковым событием для автомобилестроения в целом и МИС в частности стала выставка «Schweisstec», проходившая в Штутгарте, где компания PST (PST «Products GmbH») представила первую в мире легковесную раму корпуса легкового автомобиля, состоящую из высокопрочных алюминиевых, стальных и медных элементов, сваренных между собой полностью с помощью МИС (рис. 3) [15].

При этом разработчики выделяют следующие преимущества технологии:

- абсолютное отсутствие термических деформаций;

- сварка между собой разнородных металлов (алюминий–сталь, алюминий–медь);

- длительность импульса сварки 35 мкс;

- возможность выполнения прямолинейных сварных соединений протяженностью до 3 м.

По сути здесь определен вектор развития сборочной технологии, заключающийся в максимально полной замене всех способов сварки плавлением процессом МИС, а также вектор направления инвестиций в ближайшем будущем. В свою



Рис. 3. Первая в мире легковесная рама корпуса автомобиля из разнородных металлов, изготовленная полностью с помощью МИС

очередь это может указывать на направление исследований и разработок.

Вот перечень некоторых автомобильных узлов и деталей (рис. 4–11), где нашел применение процесс МИС [13, 16–18]: амортизаторы (алюминий или сталь); элементы подвески (разнородные металлы); компоненты шасси; блочные элементы; предохранительные крэш-боксы; элементы автомобильных кондиционеров; газовые сосуды высокого давления; маслофильтры; элементы трансмиссионного вала; элементы облегченного сидения; элементы топливопроводов; соединения элементов рамы; элементы выхлопных систем [15].

Изготовление алюминиево-стальных трансмиссионных валов с помощью МИС позволяет существенно уменьшить их массу. При этом отмечается значительное повышение производительности, улучшение экологии, уменьшение отходов и брака практически до нуля [12].

Компания «PULSAR» («Pulsar Ltd.») утверждает, что вложила в развитие и промышленную доработку МИС более 100 человеко-лет, теперь она начинает стремительно внедрять эту технологию по всему миру. Так, недавнее внедрение установки Pulsar MPW 25 на заводе известного производителя автомобильных компонентов (компания «TI Automotive») на линии сборки ресиверов-осушителей автомобильных кондиционеров

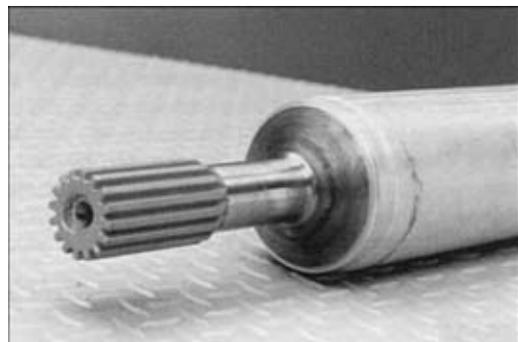


Рис. 4. Сталеалюминиевый вал, сваренный способом МИС

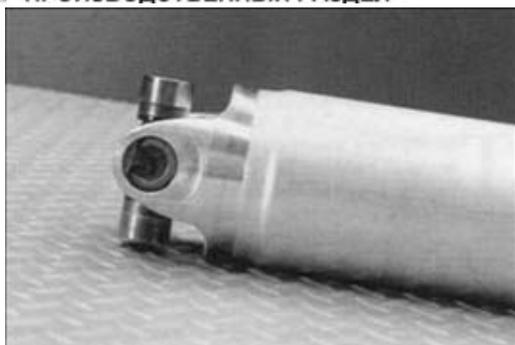


Рис. 5. Алюминиевый (Al–Al) вал, сваренный способом МИС



Рис. 6. Ресивер автомобильного кондиционера, сваренный с помощью МИС



Рис. 7. Фрагмент поперечного сечения медноалюминиевого соединения (диаметр 25 мм)

позволила заменить сварку неплавящимся электродом и достичь производительности 1000 узлов за смену, а также повысить качество изделий, снизить процент брака (рис. 7, 8) [19].

Способ МИС, используемый при сборке корпусов топливных элементов (топливных стержней) для нужд атомной энергетики, по-прежнему изучают. Он, несомненно, найдет широкое применение. В ряде случаев данная технология предпочтительнее других [20]. Этому сопутствует высокое качество и повторяемость результатов, простота, отсутствие прямого контакта с плакированной поверхностью корпуса, появление новых материалов для корпусов (из числа плакиро-



Рис. 8. Алюминиевое кольцо, приваренное к стальному болту



Рис. 9. Топливный фильтр, изготовленный с помощью МИС



Рис. 10. Образец трансмиссионного вала (алюминий–сталь), сваренного МИС, после успешных испытаний на прочность при скручивании

ванных ферритно-мартенситных и дисперсионно-упрочняемых оксидами сталей) [21, 22].

В аэрокосмической области существует постоянно возрастающая потребность в неразъемных соединениях деталей из разнородных материалов. МИС является идеальным способом соединения таких разнородных металлов, как титан–никель. В настоящее время при изготовлении топливопроводов аэрокосмического назначения используют пайку или сварку неплавящимся электродом [10]. Компания «Boeing» применяет МИС, в частности, для изготовления трубопроводной арматуры высокого давления (гидравлика) [23].

В ГКНПЦ им. М. В. Хруничева внедрен процесс МИС трубчатых конструкций с предварительной формовкой (совместная разработка с ДГТУ) [24]. Там же разработан и внедрен новый процесс получения штампованных замкнутых конструкций из тонколистовых материалов (облегченные корпуса электросоединителей) с помощью магнитно-импульсной технологии, названный разработчиками контактной МИС с совместным разогревом перехлеста индуцированными токами и воздействием импульсного магнит-

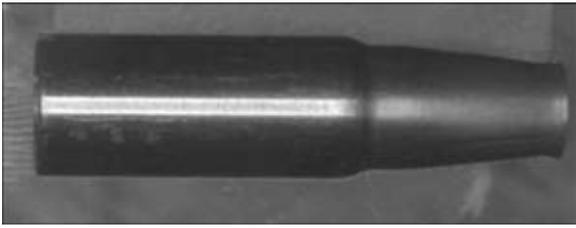


Рис. 11. Фрагмент образца топливного стержня, сваренного с помощью МИС



Рис. 12. Магнитно-импульсная резка (пробивка отверстий) деталей автомобильного назначения в Fraunhofer IWU с использованием элементов оборудования PST [28]

ного давления, т. е. сочетания МИС и электрической контактной сварки [25].

Ударно-импульсный способ сварки признан наилучшим при создании сверхпроводящего ключа с тепловым управлением в виде сэндвича $Cu-Al-Cu$ для нужд криогенной техники и технологии. Такой ключ характеризуется низким тепловым контактным сопротивлением, что делает применение МИС весьма перспективным [26]. Этот же способ дал положительные практические результаты при сварке пленок на базе аморфного никеля («металлическое стекло»), пригодного для нужд производства микроинструмента с уникальными свойствами [27].

В настоящее время на стадии доработки и предпроектного внедрения находится новый родственный процесс МИС — магнитно-импульсная пробивка отверстий (рис. 12), — разработанный специалистами фирмы «Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology» (Германия). Его отличают отсутствие изнашивающегося механического инструмента и очень высокая скорость пробивки отверстий — 0,2 с (с помощью лазерных технологий эта операция выполняется за 1,4 с). Проект финансируется компанией «Volkswagen» [28].

К родственным технологиям МИС можно отнести также получение соединений путем магнитно-импульсного обжатия (crimping) и некоторые другие магнитно-импульсные технологии.

Выводы

1. МИС и родственные технологии являются эффективными и постоянно развивающимися технологиями с большим научно-практическим потенциалом, требующими дальнейшего проведения научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ.

2. С появлением новых материалов область применения МИС будет расширяться.

3. Интерес к МИС будет усиливаться по мере повышения технико-экономических показателей оборудования, в основном благодаря снижению его стоимости и повышению долговечности элементов.

4. Объектом исследований и разработок будут как технологические аспекты МИС (улучшение свариваемости уже существующих материалов, уменьшение энергоемкости процесса), так и опытно-конструкторские разработки по совершенствованию инструментов (например, специальных видов индукторов и др.).

5. Некоторые области промышленности уже готовы к массовому внедрению МИС, ожидаемому в ближайшие годы.

1. ASM handbook / T. Lenen, T. Siewert, S. Babu, V. Acoff // Welding fundamentals and processes. — ASM International. — 2011. — 6А. — 520 p.
2. Berlin A. Magnetic pulse welding of Mg sheet: A thesis for degree master of applied science in mechanical engineering (Waterloo, Ontario, Canada, 2011). — Waterloo, 2011. — P. 10–11.
3. Hahn R. Werkzeuge zum impuls-magnetischen Warmfuegen von Profilen aus Aluminium und Magnesiumlegierungen: Diss. — Berlin, 2004. — 30 S.
4. Groche P., Elsen A. Fundamentals of EMPT-welding. Technische Universitat Darmstadt // 4th Intern. conf. on high speed forming (Columbus, Ohio, March 9/10, 2010). — Ohio, 2010. — P. 40.
5. Zhang Y., Babu S., Daehn G. S. Impact welding in a variety of geometric configurations. — Ohio: State University, 2010. — 230 p.
6. Desai S. V. Scaling relationships for input energy in electromagnetic // J. Electromagnetic Analysis & Applications. — 2010. — № 2. — P. 563–570.
7. Особенности расчета режимов магнитно-импульсной сварки / А. С. Письменный, И. В. Пентегов, Е. П. Стемковский и др. // Автомат. сварка. — 2004. — № 11. — С. 15–19.
8. Уточненный метод расчета режимов магнитно-импульсной сварки / А. С. Письменный, И. В. Пентегов, Е. П. Стемковский и др. // Там же. — 2009. — № 1. — С. 25–28.
9. Использование магнитно-импульсной обработки для изготовления тонкостенных малогабаритных деталей ЛА / А. С. Филимонов, Я. М. Баянова, И. В. Метелин, М. В. Осипов. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. — 210 с.
10. Weber A. The cold welding process is being used for more and more high-volume applications // Assembly Magazine. — 2002. — August. — P. 3–6.
11. L'assemblage par impulsion magnetique — MPT magnetic pulse technology. Technopole. — Saint-Croix, 2011 // dev.swi.heig-vd.ch/fr-ch/Micro/Documents/3-Magnetic-Pulse-Technology.pdf.



12. *The next wave in manufacturing...solid state cold welding*//www.ai-online.com/Adv/Previous/show issue.php?id=1982.
13. *Magnetic pulse welding is Dana original*//www.mtiwelding.com/files/Automotive Engineering Intl Aug 1998 MAGNETIC PULSE WELDING.pdf.
14. *Информационные материалы компании «Dana Corp.»* //www.atp.nist.gov/eao/sp950-3/danacorp.pdf.
15. *PSTproducts presents the world's first EMPT welded light-weight space frame at the Schweisstec fair*//etcna.net-rics.ch/public/pstproducts_press_release_spaceframe_including_photos.pdf.
16. *Kallee S. W. Industrialisation of electromagnetic pulse technology (EMPT) in India* // PSTproducts GmbH, 2010 //www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2010/IPM.pdf.
17. *Schafer R., Pasquale P., Kallee S. The electromagnetic pulse technology (EMPT): Forming, welding, crimping and cutting* // PSTproducts GmbH, Alzenau, 2010 //ing.dk/modules/fsArticle/download.php?fileid=740.
18. *Shribman V. Magnetic pulse welding for dissimilar and similar materials* // 3rd Intern. conf. on high speed forming, Dortmund, 2008 //eldorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/27107/1/29.pdf.
19. *TI Automotive adopts pulsar magnetic pulse welding systems for automotive air-conditioning components leading global manufacturer of automotive HVAC systems to use pulsar MPW 25 to weld automotive dryers. Auto spectator*//www.autospectator.com/cars/automotive-manufacturing/0023205-ti-automotive-adopts-pulsar-magnetic-pulse-welding-systems-automoti.
20. *Fabrication technological development of the oxide dispersion strengthened alloy MA957 for fast reactor applications* / M. L. Hamilton, D. S. Gelles, L. J. Lobsinger et al. — Richmond: Pacific Northwest National Laboratory, Febr. 2000 //www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-13168.pdf.
21. *McGinley J. Electromagnetic pulse technology as a means of joining generation IV cladding materials. European Commission JRC-ITU* // Proc. of the 17th Intern. conf. on nuclear engineering ICONE 17, July 12–16, 2009, Brussels, Belgium. 11 //www.english.pstproducts.com/index_htm_files/icone%2017_FINAL%20version.pdf.
22. *Shri S. C. Chetal sodium cooled fast reactors.* — Kalpakam: Indira Gandhi centre for atomic research, 2011 //www.igcar.gov.in/gap_web/l.htm»stl_4_2_4.
23. *Pat. Application 20060208481 USA, F16L47/00; F16L47/00 Electromagnetic pulse welding of fluid joints* / A. Fischer, D. R. Bolser. — Publ. 21.09.2006.
24. *Бацемакин М. Ю. Технология магнитно-импульсной сварки тонкостенных трубчатых деталей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.* — Ростов-на-Дону, 2007. — 23 с.
25. *Плотников В. В. Разработка процесса и оборудования магнитно-импульсной сварки облегченных корпусов электросоединителей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.* — Ростов-на-Дону, 2007. — 23 с.
26. *Impact welding: a superior method of producing joints with high thermal conductivity between petals at very low temperatures* / R. W. Willekers, W. A. Bosch, F. Mathu et al. — 1989. — Vol. 29, Issue 9. — P. 904–906 //www.sciencedirect.com/science/article/pii/0011227589902038.
27. *Explosive welding of Ni-base amorphous foils for micro-tooling applications* / R. M. Mineev, S. S. Dimov, S. R. Koev et al. //www.4m-net.org/files/papers/4M2008/05-13/05-13.pdf.
28. *It's a knockout. Engineers find a new way to punch holes through steel* // The Economist. — 2010, Jan. 14th.

The review considers the research centres dealing with magnetic-pulse welding (MPW) and presents the main area of investigations into this process. Weldability of the combined joints made by MPW is evaluated, and application fields for this process are given.

Поступила в редакцию 18.01.2012

Научно-техническая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТАЛЛУРГИИ, ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ И НАПЛАВКИ СТАЛЕЙ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ»

*К 100-летию со дня рождения засл. деятеля науки и техники,
проф. Д. М. Рабкина и д-ра техн. наук, проф. И. И. Фрумина*

25-26 октября 2012

г. Киев
ИЭС им. Е. О. Патона

Организаторы конференции
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Общество сварщиков Украины

Тематика конференции

- исследование физико-металлургических процессов при сварке и наплавке
- современные технологические процессы сварки и наплавки
- новые высокоэффективные сварочные и наплавочные материалы
- развитие способов нанесения покрытий и модифицирования поверхностей
- изготовление и ремонт сварных конструкций с применением современных технологий

Желающие принять участие в конференции должны направлять в адрес Оргкомитета до 1 июня 2012 г. предложения по теме докладов и составу участников. Условия участия в работе конференции можно уточнить в оргкомитете.

Контакты: (044) 200 54 06; 200 63 57; 200 24 66; 200 82 77
E-mail: office@paton.kiev.ua; tzu@e-mail.ua