



МНОГОСЛОЙНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПОВЫШЕННОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ, СФОРМИРОВАННЫЕ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

Р.П. ДИДЫК, В.А. КОЗЕЧКО

Нац. горный ун-т. 49027, г. Днепропетровск, просп. К.Маркса, 19. E-mail: didyk@nmu.org.ua

Применение слоистых конструкционных материалов перспективно при решении проблемы повышения надежности и долговечности тяжелонагруженных машин и оборудования. В работе рассмотрена возможность использования сварки взрывом с целью получения многослойных конструкций с высоким ресурсом трещиностойкости, достигаемым за счет управления составом и свойствами зоны соединения путем введения барьерных слоев. В качестве барьерного слоя предложено использовать металлы, не взаимодействующие в твердом состоянии или образующие твердые растворы замещения (ванадий, медь, никель). Анализ результатов испытаний слоистых образцов на многоцикловую усталость в условиях пульсирующего растягивающего цикла позволил установить кинетику усталостного разрушения, зависящего от структурного состояния межслойной границы металлической композиции. Показано, что введение в структуру композиции промежуточного металлического слоя, характеризующегося резко отличными физико-механическими свойствами и повышенной вязкостью, приводит к повышению трещиностойкости материала по сравнению с одноименным эквивалентом. Библиогр. 5, рис. 3.

Ключевые слова: сварка взрывом, слоистые композиционные материалы, многослойные конструкции, трещиностойкость композиций, барьерные слои, медь, зона пластической деформации

Одним из основных путей решения проблемы повышения надежности и долговечности конструкций деталей машин, работающих в жестких условиях нагружения, может быть создание слоистых композиционных материалов, позволяющих формировать структуру и границы раздела слоев в соответствии с условиями эксплуатации деталей.

Изготовление слоистых композиционных материалов осуществляется горячей и холодной пластической деформацией заготовок прокаткой или прессованием, термодиффузионной сваркой, литьем, различными видами осаждения на поверхность одного или нескольких компонентов либо сочетанием этих методов. Однако существенными недостатками перечисленных способов является их избирательность, связанная с проблемой получения прочной физической связи металлов и сплавов, резко отличающихся по комплексу физико-механических и химических характеристик [1]. В этой связи актуальность технологических процессов, основанных на возможности получения прочных металлических композиций практически из любых сочетаний и управление строением и свойствами границы соединения не вызывают сомнений. К таким процессам можно отнести сварку взрывом [2].

Сварка взрывом имеет ряд особенностей, являющихся следствием высокой интенсивности пластического течения и кратковременности действия высоких градиентов давлений и температур в приконтактных слоях соударяющихся пластин. В

специфических условиях сварки взрывом как одной из наиболее выгодных форм превращения кинетической энергии соударяющихся тел в работу пластической деформации является процесс волнообразования, который существенно влияет на строение контактной зоны и, соответственно, на свойства соединения [3]. Следует отметить, что уникальные возможности сварки взрывом в основном были реализованы как эффективное средство в технологии производства биметаллической продукции с целью экономии дефицитных цветных металлов и сплавов.

В предлагаемой работе впервые рассматривается возможность использования сварки взрывом для получения многослойных конструкций, характеризующихся высоким ресурсом трещиностойкости.

При сварке взрывом многослойных композиций возможно как последовательное соединение пластин, так и одновременное соединение всего пакета за одну операцию, реализуемых как для получения плоских многослойных конструкций, так и пространственных с цилиндрической и конической симметрией. Наибольшее распространение получило одновременное многослойное соединение при параллельной схеме ориентации свариваемых элементов. При этом вначале происходит соударение верхней пластины с промежуточной, затем промежуточная пластина приобретает скорость верхней пластины и осуществляется совместный полет двух пластин, и так далее. Од-

нако при сварке взрывом многослойных композиций возникают проблемы, связанные с изменением параметров процесса: уменьшением угла соударения, снижением давления при переходе от верхнего к нижнему листу, что, в свою очередь, вызывает изменение границы соединения слоев – от непрерывного слоя расплавов вдоль всей границы контактирования к синусоидальной границе с наличием вихревых зон или прямолинейной границе без образования участков литой структуры и, следовательно, к изменению прочности сцепления слоев. Этот недостаток можно исключить использованием направляющего элемента соответствующей массы. В этом случае угол соударения задается направляющей пластиной, импульс которой практически не изменяется при взаимодействии с первым листом, имеющим меньшую массу. Угол соударения направляющей пластины повторяется первым листом, скорость полета которого также равна скорости направляющей пластины, что повторяется и для следующих листов практически без изменения параметров соударения, т. е. взрывная технология позволяет получать качественные соединения как двухслойных, так и многослойных композиций (рис. 1).

Создание новых слоистых композиций с заданным уровнем свойств и рациональной структурой материала требует обоснованного выбора компонентов и технологии их изготовления. Выбор материала слоев осуществляется исходя из условий эксплуатации изделия, а также химической (термодинамической и кинетической) и механической совместимости компонентов. Термодинамически совместимыми компонентами считаются неразстворимые друг в друге и не образующие химических соединений металлы (например, Mo–Si, Nb–Si). Большинство термодинамически несовместимых компонентов в определенных температурно-временных условиях могут быть совместимы кинетически (метастабильное равновесие) и обеспечить надежность работы конструкции. Механическая совместимость, заключающаяся в соответствии упругих постоянных, коэффициентов термического расширения и показателей пластичности составляющих материала, определяет напряженно-деформированное состояние слоистых материалов.

Работоспособность композиционных изделий определяется неоднородной по составу зоной соединения, структура и свойства которой формируются в процессе сварки взрывом за счет расплавления приповерхностных слоев, их перемешивания и диффузии элементов. В зоне соединения возможно получение переходных слоев с пониженной или повышенной, относительно исходных материалов, микротвердостью, обра-

зование хрупких интерметаллидов и т.д. В зависимости от этого меняется характер разрушения переходной зоны: от вязко-пластичного к сколу с участками поверхности вязкого разрушения или хрупкому сколу [3]. Из сказанного выше следует необходимость получения сочетания прочности материала переходных слоев с его достаточно высокой пластичностью, что может быть обеспечено технологическими параметрами сварки взрывом.

При создании трещиностойких слоистых композиций рассмотрена возможность управления составом и свойствами зоны соединения путем введения барьерных слоев. Применение этих слоев при создании слоистых материалов для химически взаимодействующих компонентов является достаточно известным методом [4, 5]. Барьерный слой играет роль инертной прослойки, не позволяющей взаимодействовать свариваемым слоям. В задачу исследования входила оценка возможности использования вязкой прослойки в качестве барьерного слоя, препятствующего развитию трещины, изучение взаимодействия трещины с прослойкой и создание рациональной структуры композиционного материала, способствующей снижению скорости распространения трещин, изменению ее направления и остановке. В качестве барьерного слоя предлагается использовать металлы, не взаимодействующие в твердом состоянии или образующие твердые растворы замещения, ванадий, медь, никель. Наиболее перспективным материалом является медь, которая исключает возможность образования интерметаллидных и карбидных соединений.

С целью изучения трещиностойкости слоистых композиционных материалов, полученных сваркой взрывом, проведены исследования композиций на основе стали 45: биметалла сталь–сталь и триметалла сталь–медь–сталь на многоцикловую усталость на машине УРМ-2000 по схеме пульсирующего растяжения с максимальным напряжением

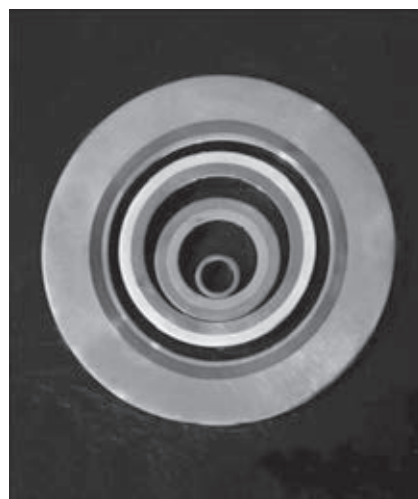


Рис. 1. Двух- и трехслойные трубы, сваренные взрывом

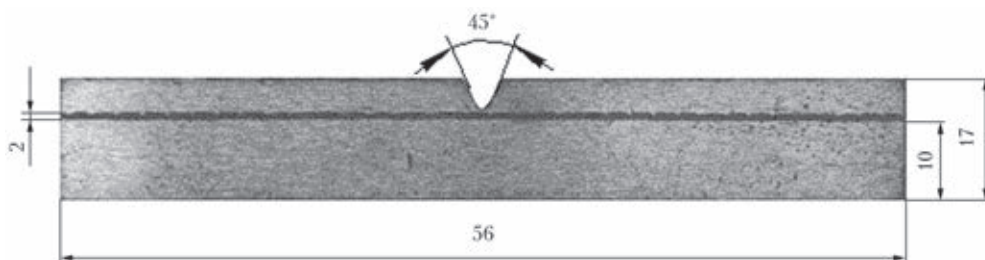


Рис. 2. Вид образца триметалла сталь–медь–сталь для испытания на многоцикловую усталость

ем цикла 250 МПа, коэффициентом асимметрии цикла 0,2 и частотой нагружения 400 цикл/мин. Вид и форма образца приведены на рис. 2.

Испытания проводили при постоянной нагрузке, т. е. с развитием усталостной трещины в оставшейся части сечения напряжения возрастали. Процесс роста усталостной трещины исследовали на плоских прямоугольных образцах с боковым надрезом. Наличие острого бокового надреза предопределяло зарождение и распространение трещины в поперечном направлении. Надрез проводили в стали 45, дно надреза в биметаллах располагалось на расстоянии 3 мм от границы соединения слоев, в триметаллах — на расстоянии 2,5 мм. При одних и тех же условиях испытывали не менее шести образцов. Лицевые поверхности образцов полировали от вершины иницирующего надреза в направлении будущей усталостной трещины (шероховатость в местах полировки составляла 0,05...0,08 мкм), а затем на пути роста трещины наносили измерительную шкалу с ценой деления 1 мм. Наблюдение за развитием усталостной трещины осуществлялось с помощью микроскопа типа МВТ, установленном на специальном кронштейне на станине машины. Длину трещины, которую она приобрела за определенное количество циклов нагружения образца, измеряли при остановке машины, перемещая по горизонтали и вертикали объектив микроскопа с помощью микрометрических винтов. Замер длины трещины проводили по лимбу микроскопа с точностью 0,01 мм.

Анализ полученных результатов показал, что начальная усталостная трещина в стали 45 зародилась за время $9 \cdot 10^{-4}$ циклов. Период распространения трещин усталости до границы раздела сталь–сталь в биметалле и сталь–медь (граница А) в триметалле практически одинаков и составил 140700 циклов. После перехода усталостной трещины через границу раздела во второй слой в биметалле быстро наступал долом образца, а триметалл простоял еще 122262 цикла, из которых 18962 цикла трещина просто распространялась по медной прослойке и 103300 циклов потребовалось на расслоение по границе медь–сталь (граница Б) и на зарождение усталостной трещины во втором стальном слое. Долговечность трехслой-

ных образцов составила 348000 циклов, а двухслойных — 237700 циклов.

Результаты экспериментов, приведенные на рис. 3, позволили установить кинетику роста усталостных трещин. Полученная зависимость длины усталостной трещины от количества циклов нагружения показывает, что изменение скорости распространения трещины в биметалле до границы соединения совпадает с изменением скорости в триметалле до границы сталь–медь. В биметалле, в котором и основной, и плакирующий слой выполнены из одного материала, прочное соединение слоев, исключающее возможность расслоения по границе соединения, обусловило переход трещины из одного слоя в другой с некоторой задержкой. В трехслойной же композиции скорость усталостной трещины, перешедшей в медную прослойку, сразу падает. Скорость трещины, достигшей середины прослойки, снижается на 40 % по сравнению со скоростью трещины на границе сталь–медь. По мере приближения трещины к границе медь–сталь ее скорость постоянно падает, происходит торможение трещины, и на границе медь–сталь скорость соответствует началу роста трещины в основном стальном слое.

Перешедшая в медную прослойку трещина изменяет направление своего распространения, отклоняется от плоскости влияния максимальных растягивающих напряжений и развивается в направлении влияния максимальных касательных напряжений. Изменение направления распространения усталостной трещины в медной прослойке вызвано изменением типа усталостного трещинообразования. Медь — материал с большой энергией дефектов упаковки, у которой в связи с высокой способностью переползания винтовых дислокаций из одной кристаллографической плоскости в другую обеспечено поперечное скольжение. В медной прослойке при циклическом нагружении наблюдается значительное количество микротрещин, происходит ветвление трещины, большинство из которых прекращает свой рост, однако часть микротрещин продолжает свое развитие, соединяясь между собой и образуя магистральную макротрещину.

Приблизившись к границе медь–сталь, усталостная трещина отклоняется от первоначаль-

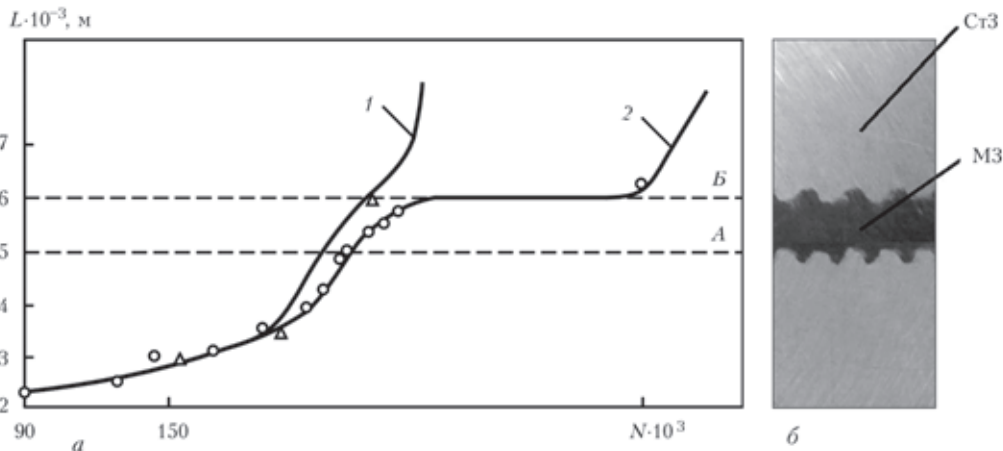


Рис. 3. Кинетика роста усталостной трещины в слоистых образцах на основе стали 45 при испытании в условиях пульсирующего растяжения (а): 1 — сталь–сталь; 2 — сталь–медь–сталь; А — граница соединения в биметалле сталь–сталь; А-В — медная прослойка в биметалле сталь–медь–сталь; б — вид границы соединения сталь 45–М3–сталь 45

ного направления движения и распространяется в обе стороны вдоль границы раздела. При этом рост магистральной трещины прекращается, а сама трещина остается в вязкой прослойке (горизонтальный участок кривой 2 на рис. 3). Задержка движения трещины при переходе из медного в стальной слой связана с движением трещины вдоль границы медь–сталь и с механизмом ее зарождения в стальном слое. Граница медь–сталь стала препятствием, остановившим рост усталостной трещины и значительно увеличившим долговечность металлической композиции. Процесс разрушения второго слоя стали происходит аналогично разрушению в первом стальном слое.

Физическая природа разрушения металла при циклическом нагружении связана с накапливаемой пластической деформацией [5]. Формирование зон локальной пластической деформации у вершины надреза при испытаниях образцов в условиях пульсирующего растяжения изучалось визуальным наблюдением шлифованной поверхности. Зона деформации и поверхность разрушения дополнительно исследовались с помощью оптического микроскопа.

Таким образом, установлены следующие закономерности формирования зон локальной пластической деформации и движения трещины: в процессе нагружения у вершины надреза под углом 45° относительно оси приложения нагрузки формируются две симметричные зоны локальной пластической деформации в форме лепестков, представляющие собой концентрацию фронта пластической деформации, размеры которых возрастают с ростом нагрузки; развитие зон до момента достижения нагрузки величины, близкой к максимальной, происходит симметрично, затем рост одной из них замедляется, а второй — интенсивно увеличивается и в

ней начинает формироваться магистральная трещина; локальная пластическая деформация при сварке взрывом развивается в поверхностных слоях с образованием бугра деформации и впадины; возникновение трещины наблюдается на поверхности образца у кромки надреза в области максимального течения металла (переход от бугра деформации во впадину); разрушение носит дискретный характер и представляет собой соединение пор и разрывов в области локальной пластической деформации; траектория движения трещины имеет сложную конфигурацию и зависит от количества и свойств слоев; при переходе трещины из материала с близкими значениями модулей упругости наблюдается переход трещины через границу раздела в другой материал без изменения направления распространения; переход трещины из материала с более низким модулем упругости в материал с более высоким модулем затруднен, наблюдается длительное движение трещины по границе раздела; введение в структуру композиции промежуточного металлического слоя, характеризующегося резко отличными физико-механическими свойствами и повышенной вязкостью, приводит к повышению трещиностойкости материала по сравнению с одноименным эквивалентом.

1. *Биметаллические трубы* / М.И. Чепурко, Е.А. Резников, А.М. Буйновский, Р.П. Дидык. — М.: Металлургиздат, 1974. — 374 с.
2. *Дидык Р.П.* Высокоэнергетическая обработка материалов — технология XXI века // Тяж. машиностроение. — 2006. — С. 17–20.
3. *Mali V.I.* Structural features of wave formation in explosive welding. — Moscow, 2010. — P. 42–43.
4. *Батаев И.А., Батаев А.А., Мали В.И.* Увеличение ударной вязкости слоистых композитов, полученных методом сварки взрывом стальных пластин // Заблуждения науч. чтения. — Снежинск, 2010. — С. 24–28.
5. *Ковалевский В.Н.* Оценка работоспособности и разрушения слоистых материалов, полученных сваркой взрывом // Сварка и родственные технологии: Республ. межвед. сб. науч. тр. — Минск. — 1999. — Вып. 2. — С. 50–52.

Поступила в редакцию 02.09.2014