

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

Р. П. Дидык, В. Е. Олишевская, Г. С. Олишевский

Национальный горный университет, Днепрпетровск

Надійшла до редакції 28.03.06

Резюме: Экспериментально доказана возможность повышения трещиностойкости конструкционных материалов путем использования слоистых композиций, имеющих в своей структуре барьеры – границы слоев, созданные сваркой взрывом.

Ключевые слова: слоистый композиционный материал, сварка взрывом, граница раздела, трещина, трещиностойкость, кинетика усталостного разрушения, механизм разрушения.

Р. П. Дідик, В. Є. Олішевська, Г. С. Олішевський. ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦІЯ І ПОШИРЕННЯ ВТОМЛЕНИХ ТРІЩИН У ШАРОВИХ МЕТАЛЕВИХ КОМПОЗИЦІЯХ, ОТРИМАНИХ ЗВАРЮВАННЯМ ВИБУХОМ.

Резюме: Экспериментально доведена можливість підвищення тріщиностійкості конструкційних матеріалів шляхом використання шаруватих композицій, що мають у своїй структурі бар'єри – межі шарів, створені зварюванням вибухом.

Ключові слова: шаровий композиційний матеріал, зварювання вибухом, межа розділу, тріщина, тріщиностійкість, кінетика руйнування від утомленості, механізм руйнування.

R. P. Didyk, V. E. Olishevskaya, G. S. Olishevsky. PLASTIC DEFORMATION AND GROWTH OF FATIGUE CRACKS IN LAMINATED METAL COMPOSITIONS PRODUCED BY MEANS OF EXPLOSION WELDING.

Abstract: The experimental study of laminated materials showed that laminated compositions having definite relation of layers' physical and mechanical properties allow to increase the crack resistance under the conditions of multi-cycle loading.

Keywords: laminated composite material, explosion welding, separation border, crack, crack resistance, kinetics of fatigue failure, mechanism of destruction.

Современное развитие машиностроения требует создания новых технологических процессов, обеспечивающих изготовление конструкций, надежно работающих в экстремальных условиях действия высоких температур и давлений. Удовлетворить этим требованиям можно при условии создания новых конструкцион-

ных материалов, сочетающих в себе высокий уровень эксплуатационных характеристик с показателями надежности работы конструкций.

Одним из путей решения проблемы повышения надежности и долговечности конструкций и деталей машин, работающих в жестких условиях нагружения, может быть

создание слоистых композиционных материалов, позволяющих формировать структуру и границы раздела слоев композитов в соответствии с условиями эксплуатации деталей.

Изготовление слоистых композиционных материалов осуществляется горячей и холодной пластической деформацией заготовок прокаткой, прессованием, диффузионной сваркой, литьем, различными видами осаждения на поверхность одного или нескольких компонентов, либо сочетанием этих методов. Однако существенным недостатком перечисленных способов является их избирательность, связанная с проблемой получения прочной физической связи металлов и сплавов, резко отличающихся по комплексу физико-механических и химических свойств.

В этой связи актуальность технологических процессов, основанных на возможности получения прочных металлических композиций практически из любых сочетаний, и управления строением и свойствами границы соединений не вызывает сомнений. К таким процессам можно отнести сварку взрывом.

Следует отметить, что уникальные возможности сварки взрывом в основном были реализованы как эффективное средство в технологии производства различной поли- и биметаллической продукции с целью экономии дефицитных цветных металлов и сплавов.

Нами впервые рассмотрена возможность использования сварки взрывом для получения многослойных конструкций, обладающих высоким ресурсом трещиностойкости.

При создании трещиностойких слоистых композиций была рассмотрена возможность управления свойствами зоны соединения путем введения барьерных слоев. Применение барьерных слоев при создании слоистых материалов для химически взаимодействующих компонентов является достаточно известным методом [1]. В этом случае барьерный слой играет роль инертной прослойки, не позволяющей взаимодействовать свариваемым слоям.

В нашем случае в задачу исследования входила оценка возможности использования вязкой прослойки в качестве барьера, препятствующего развитию трещины, изучение взаимодействия трещины с прослойкой и создание рациональной структуры композиционного материала, способствующей снижению скорости распространения трещин, изменению ее направления и остановке.

С целью исследования возможности повышения трещиностойкости конструкционных материалов были изготовлены сваркой взрывом би- и трехслойные (с промежуточной пластичной прослойкой) композиции на основе конструкционной стали. В качестве материала слоев композиций выбрана широко применяемая сталь 45. В качестве барьерного слоя желательнее использовать металлы, не взаимодействующие в твердом состоянии или образующие твердые растворы замещения: ванадий, медь, никель. Наиболее перспективным материалом барьерного слоя является медь, которая в определенных условиях исключает возможность образования интерметаллидных и карбидных соединений. Сварные образцы получены по схеме параллельного плакирования [2, 3]. Биметалл сталь 45–сталь 45 изготовлен плакированием листа стали размером 300×200×30 мм листом меди МЗ толщиной 8 мм (режим 1: скорость метания пластины $V_C = 286,9$ м/с, скорость движения точки контакта $V_K = 1950$ м/с, угол соударения $\gamma = 8^\circ 20'$, давление на границе соударения $P = 6,7$ ГПа). Триметалл сталь 45–медь МЗ–сталь 45 получен сваркой взрывом в два этапа: на первом этапе – плакировали лист стали 45 размером 300×200×30 мм листом меди МЗ толщиной 1 мм (режим 2: скорость метания пластины $V_C = 352,9$ м/с, скорость движения точки контакта $V_K = 1562$ м/с, угол соударения $\gamma = 12^\circ$, давление на границе соударения $P = 7,7$ ГПа), на втором этапе – биметалл сталь 45–медь МЗ плакировали листом стали 45 толщиной 8 мм (по режиму 1).

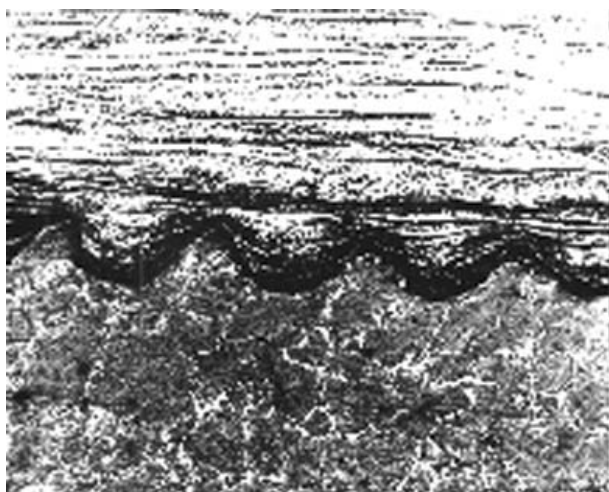


Рис. 1. Микроструктура зони з'єднання сталь 45–мідь МЗ, $\times 50$

Сварка взривом має ряд особливостей, являючись слідствием високої інтенсивності пластического течення свариваемых металлов и кратковременности действия высоких давлений и температур в приконтактных слоях соударяющихся пластин. В специфических условиях сварки взрывом наиболее выгодной формой перехода кинетической энергии соударяющихся тел в работу пластической деформации является процесс волнообразования, который существенно влияет на строение сварного шва и околошовной зоны и, соответственно, на свойства и работоспособность композиционных изделий в целом.

Структура и свойства неоднородной по составу зоны соединения формируются в процессе сварки взрывом за счет расплавления поверхностных слоев, их перемешивания и диффузии элементов. При этом в зоне соединения возможны формирование переходных слоев с пониженной или повышенной (относительно исходных материалов) микротвердостью, образование хрупких интерметаллидов и т. д. В зависимости от этого меняется характер разрушения переходной зоны: от вязко-пластичного к сколу с участками по-

верхности вязкого разрушения или хрупкому сколу [4].

Металлографические исследования биметаллических соединений сталь 45–сталь 45 показали, что в зоне соединения слоев, полученных при выбранных режимах сварки, наблюдаются регулярные волны, оплавленные участки отсутствуют.

Исследование трехслойных композиций сталь 45–мідь МЗ–сталь 45 показало, что вдоль границ раздела сталь–мідь (граница А) и мідь–сталь (граница Б) расположены зоны, включающие вихревые области, где одновременно присутствуют мідь и сталь (рис. 1) [5]. Такие зоны называют "зонами перемешивания", определяя этим термином процессы взаимного перемещения слоев металла при пластических деформациях волнообразования. Эти зоны характеризуются высокой степенью измельчения зерна. Слои меди, прилегающие к зонам перемешивания, в отдельных участках имеют мелкое равновесное недеформированное зерно. Участки с мелкими недеформированными зернами образовались путем рекристаллизации, обусловленной высокой степенью деформации и интенсивным выделением тепла в зоне перемешивания. Далее в меди располагается зона сильно деформированных зерен, ориентированная по границе зоны перемешивания. Примерно аналогичная картина наблюдается и в стали, где вдоль зоны перемешивания располагается узкая полоса мелкого равновесного зерна феррита, которая сменяется зоной сплошного деформирования.

Сварка взрывом сопровождается значительным упрочнением металлов в зоне соударения. Измерение микротвердости в биметалле сталь 45–сталь 45 показало резкое повышение твердости в зоне соединения. Если сталь в исходном состоянии имела микротвердость H_{50} –2300–2600, то в зоне соединения – примерно H_{50} –4400. На участках шириной 0,2–0,3 мм, прилегающих к зоне переме-

шивання, твердость быстро снижалась [5]. Измерение микротвердости в триметалле сталь 45–медь МЗ–сталь 45 показало, что если в исходном состоянии микротвердость промышленной меди МЗ была порядка $H_{50}-1000$, а стали 45 – $H_{50}-2300-2600$, то микротвердость упрочненных пластической деформацией металлов в зонах перемешивания достигала следующих значений: на границе сталь–медь (граница А) сталь упрочнилась до $H_{50}-3740$, медь – до $H_{50}-1710$, на границе медь–сталь (граница Б) сталь упрочнилась до $H_{50}-4900$, медь – до $H_{50}-1400$ [5]. Скачок твердости на границе А составил $H_{50}-2030$, на границе Б – $H_{50}-3500$.

Исследования распространения усталостных трещин в слоистых материалах проводились на машине УРМ-2000 по схеме пульсирующего растяжения с максимальным напряжением цикла 250 МПа, коэффициентом асимметрии цикла 0,2 и частотой нагружения 400 цикл/мин. 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 интересующем поперечном направлении. Надрез производился 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. Для наблюдения за движением усталостной трещины 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 число циклов нагружения образца, измеряли при остановке машины, перемещая по горизонтали и вертикали объектив микроскопа с помощью микрометрических винтов. Замер длины трещины производился по лимбу микроскопа с точностью 0,01 мм.

Анализ полученных результатов показал, что начальная усталостная трещина в стали 45 зарождалась 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 140 700 циклов. После перехода усталостной трещины через границу раздела во второй слой в биметалле быстро наступал долом образца, а триметалл простоял еще 122 262 цикла, из которых 18 962 цикла трещина распространялась по медной прослойке и 103 300 циклов потребовалось на расслоение по границе медь–сталь (граница Б) и на зарождение усталостной трещины во втором

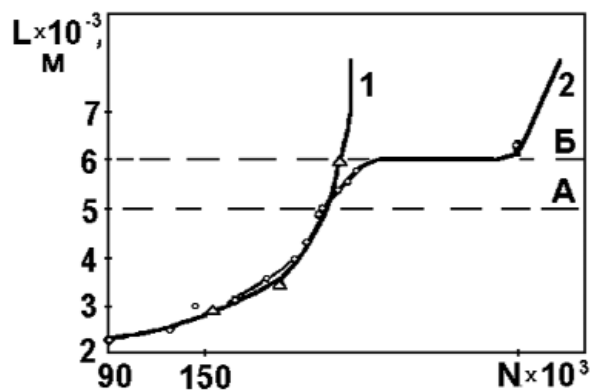


Рис. 2. Кинетика роста усталостной трещины в слоистых образцах на основе стали 45 при испытании в условиях пульсирующего растяжения: 1 – сталь 45–сталь 45; 2 – сталь 45–медь–сталь 45; А – граница соединения в биметалле сталь 45–сталь 45; А–Б – медная прослойка в триметалле сталь 45–медь–сталь 45

стальном слое. Долговечность трехслойных образцов составила 348 000 циклов, а двухслойных – 237 700 циклов.

Результаты экспериментов, обработанные на ПЭВМ и приведенные на рис. 2, позволили установить кинетику роста усталостных трещин. Полученная зависимость длины усталостной трещины от числа циклов нагружения показывает, что развитие трещин в первом стальном слое (до границы А, рис. 2) как в биметалле, так и в триметалле происходит идентично. Однако при достижении трещиной границы соединения слоев кинетика разрушения композитов принципиально меняется. В биметалле трещина переходит во второй слой и распространяется с возрастающей скоростью вплоть до разрушения образца (кривая 1, рис. 2). В триметалле наблюдается изменение угла наклона на кинетической кривой 2 (рис. 2), которое отражает торможение усталостной трещины пластичной прослойкой (участок А–Б), и образование горизонтального участка (на линии Б), вызванное остановкой магистральной усталостной трещины на границе медь–сталь.

Анализ кривых зависимости скорости роста усталостной трещины от ее длины (рис. 3) показывает, что скорость распространения трещины не остается постоянной, а сначала медленно, а затем все быстрее возрастает, достигая в момент окончательного разрушения максимального значения. Изменение скорости распространения трещины до границы соединения слоев в биметалле совпадает с изменением скорости до границы сталь–медь (граница А) в триметалле (рис. 2, 3). В момент перехода границы А в биметалле скорость усталостной трещины достигала значения $6,86 \cdot 10^{-8}$ м/цикл, а в триметалле на границе сталь–медь (граница А) – $6,97 \cdot 10^{-8}$ м/цикл. В двухслойной композиции, в которой и основной, и плакирующий слои выполнены из стали 45, прочное соединение слоев, исключаящее возможность расслоений по границе раздела, обеспечило переход трещины из одного слоя в другой без задержки. В трехслойной композиции скорость усталостной трещины, перешедшей в медную прослойку, сразу падала до значения $5,82 \cdot 10^{-8}$ м/цикл. Трещина, достигшая середины медной прослойки, имела

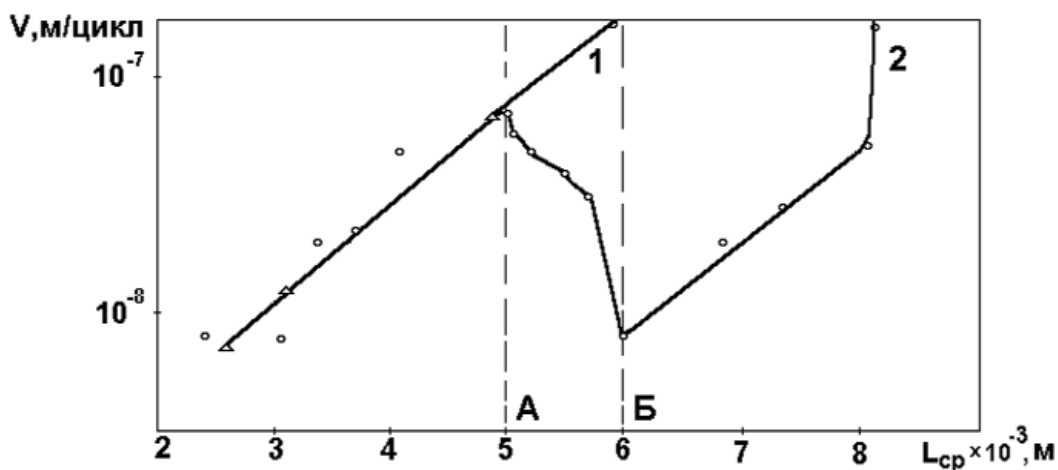


Рис. 3. Зависимость скорости роста усталостной трещины от ее длины: 1 – сталь 45–сталь 45; 2 – сталь 45–медь МЗ–сталь 45; А – граница соединения в биметалле сталь 45–сталь 45; А–Б – медная прослойка в триметалле сталь 45–медь–сталь 45

скорость $4,08 \cdot 10^{-8}$ м/цикл, т. е. уменьшилась на 42 % по сравнению со скоростью трещины на границе сталь–медь. По мере приближения трещины к границе медь–сталь (граница Б, рис. 3) ее скорость постоянно падала, происходило торможение трещины и на границе медь–сталь средняя скорость составляла уже $0,48 \cdot 10^{-8}$ м/цикл, что соответствовало началу роста трещины в первом слое стали 45. Процесс разрушения второго слоя стали происходил аналогично разрушению в первом слое.

Циклическую деформацию и разрушение сопровождают сложные конкурирующие процессы: разблокировка дислокаций и возникновение новых дислокаций (деформационное упрочнение); возникновение повреждаемости (пор, субмикротрещин, микротрещин); вторичная блокировка дислокаций (динамическое деформационное старение) [1, 6], которые определяются не только условиями нагружения, но и сформировавшейся структурой материала.

Существующие представления о разрушении как дискретном процессе основаны на

скочкообразности роста трещины при исчерпании пластичности у ее вершины, что сопровождается эмиссией волн напряжений [7]. Механизм исчерпания пластичности зависит от локального напряженного состояния у вершины трещины, характеризуемого наличием трех зон с различным уровнем напряжений: в зоне 1 существуют сжимающие, а в зонах 2, 3 – растягивающие напряжения (рис. 4).

Физическая природа разрушения металла при циклическом нагружении связана с накопленной пластической деформацией [1, 6]. 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.

Установлены следующие закономерности формирования зон локальной пластической деформации: в процессе пластической деформации локальная деформация у вершины трещины, где значения локальных напряжений превышают предел текучести материала, формирует две симметричные области плоской деформации в форме лепестков, распо-

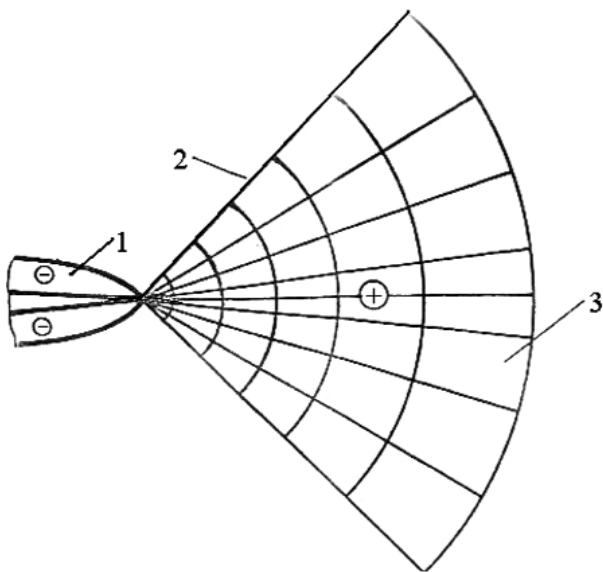


Рис. 4. Распределение напряжений в зоне у вершины трещины: 1 – сжимающие; 2, 3 – растягивающие

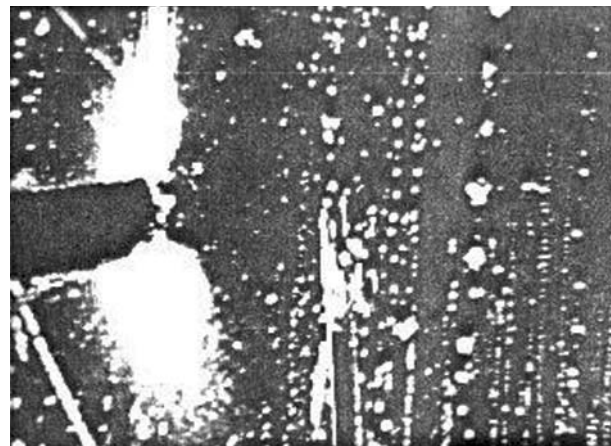


Рис. 5. Вид пластической зоны у вершины трещины в соединении, $\times 500$

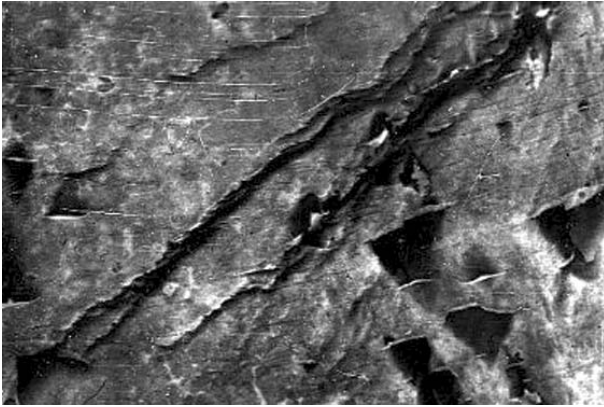


Рис. 6. Формирование микропор в зоне деформации, $\times 2000$

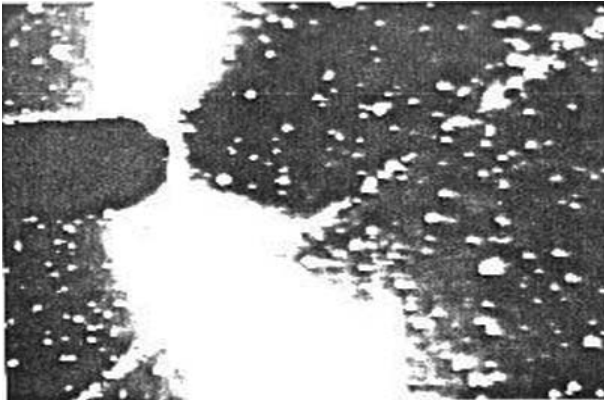


Рис. 7. Рост пластической зоны у вершины трещины, $\times 500$

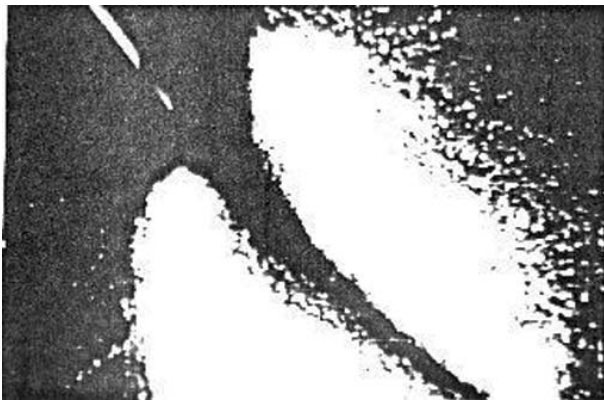


Рис. 8. Формирование трещины в соединении, $\times 500$

женных под углом примерно 45° относительно оси приложения нагрузки (рис. 5), в которых характерно появление микропор и деформационных полос (складок) на поверхности (рис. 6). Развитие зон до момента достижения нагрузкой величины, близкой к максимальной, происходит симметрично, затем рост одной из них замедляется, а второй – интенсивно увеличивается (рис. 7) и в ней начинает формироваться магистральная трещина (рис. 8). В соответствии с напряжениями, возникающими в этой зоне (рис. 4), локальная пластическая деформация развивается в поверхностных слоях с выдавливанием бугра деформации и образованием впадины. В переходной области бугор деформации – впадина, являющейся зоной интенсивного пластического течения, при достижении предельных для данного материала локальных пластических деформаций происходит образование начальной трещины путем выхода дислокаций на поверхность, образования микропор в форме тетраэдров, слияние которых и формирует магистральную трещину (рис. 9). Более интенсивная деформация поверхностного слоя по толщине у вершины надреза приводит к превышению скорости распростране-

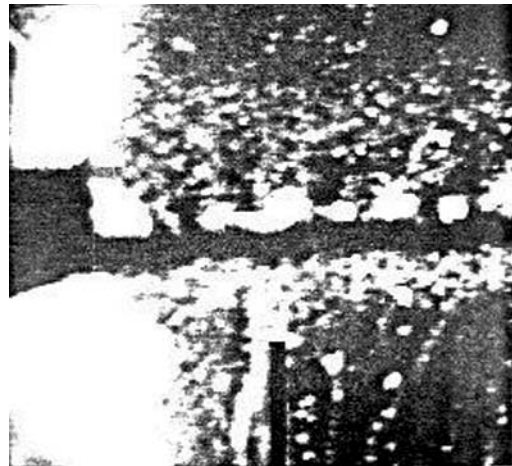


Рис. 9. Соединение пор и разрывов в трещине, $\times 500$

ния трещины вглубь образца над скоростью ее перемещения по наружной поверхности. Разрушение носит дискретный характер и представляет собой соединение пор и разрывов в области локальной пластической деформации.

Траектория движения усталостной трещины в слоистом материале имеет сложную конфигурацию, обусловленную изменением характера разрушения различных слоев композиций, из которых большее значение приобретает зона соединения слоев. Изменение траектории распространения усталостной трещины рассмотрено на примере разрушения триметалла сталь 45–медь МЗ–сталь 45. Разрушение слоя стали носит характер хрупкого разрушения в виде скола. 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 ко-

торого в связи с высокой способностью переползания винтовых дислокаций из одной кристаллографической плоскости в другую обеспечено поперечное скольжение. Микротрещины усталости возникают в полосах скольжения и продолжают развиваться в пределах этих полос в направлении влияния максимальных касательных напряжений. При одноосном нагружении растяжением это направление соответствует плоскостям, расположенным под углом 45° к боковой поверхности образца. Совпадение плоскости распространения трещины с направлением влияния максимальных касательных напряжений объясняется тем, что в каждом отдельном зерне поликристалла имеется достаточное количество потенциальных систем активного скольжения, позволяющих задействовать плоскости, наиболее благоприятно ориентированные для реализации сдвига. В медной прослойке при циклическом нагружении происходит ветвление трещины, наблюдается значительное количество микротрещин, большинство из которых прекращает расти, однако часть микротрещин продолжает развиваться, объединяясь между собой и образуя магистральную макротрещину.

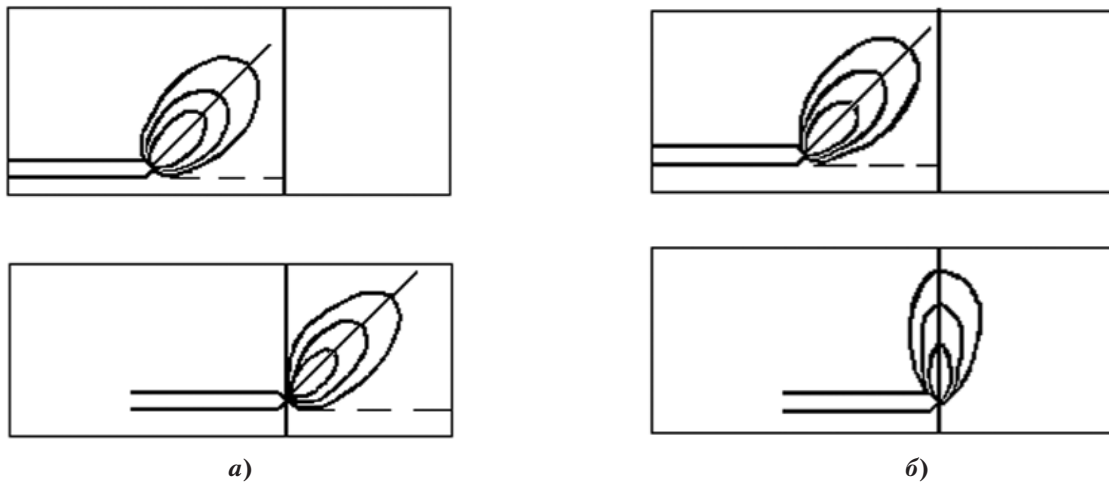


Рис. 10. Схема развития пластической зоны у вершины трещины

Кроме того, с ростом длины происходит повторная переориентация сдвиговой трещины в плоскость влияния максимальных растягивающих напряжений. На этом заканчивается первая стадия разрушения медной прослойки – кристаллографического распространения трещины. Вторая стадия – субкритическое распространение трещины – протекает по схеме нормального отрыва.

Приблизившись к границе медь–сталь, усталостная трещина отклоняется от первоначального направления движения и распространяется в обе стороны вдоль границы раздела. При этом рост магистральной трещины прекращается, т. е. процесс разрушения вдоль ширины образца останавливается (горизонтальный участок кривой 2 на рис. 2).

Проведенные исследования показали, что траектория усталостной трещины, распространяющейся в слоистом материале, имеет сложную конфигурацию, вызванную ее ветвлением по промежуточной прослойке и торможением трещины у препятствия (границы раздела слоев).

Наблюдаемое в эксперименте поведение усталостной трещины согласуется с численными результатами профессора В. Н. Ковалевского [4] по определению направления движения трещины на границе раздела, представленными на рис. 10. Анализ полученных экспериментальных результатов и результатов численного расчета [4] позволяет сделать следующие выводы:

- при переходе трещины из материала с более высоким модулем упругости (сталь 45) в материал с более низким значением (медь) пластическая зона развивается впереди трещины и наиболее вероятен переход трещины через границу раздела в другой материал (рис. 10, а),
- при переходе трещины из материала с более низким модулем упругости в материал с более высоким модулем упругости развитие пластической зоны идет вдоль гра-

ницы соединения, что делает более вероятным движение трещины по границе раздела (рис. 10, б).

Для меди разрушение обусловлено локальной концентрацией пластической деформации в процессе циклического нагружения. В процессе локализованного пластического сдвига в связи с накоплением остаточных смещений из-за необратимой пластической деформации в монолитных медных образцах развивается рельеф на первоначально гладкой поверхности [8]. По мере увеличения количества циклов идет накопление на поверхности вертикальных смещений с образованием пакетно распределенных впадин и выступов, служащих местами больших концентраций деформаций, что ведет к возникновению разрывов – микротрещин. Формирование микротрещины происходит, когда концентрация напряжений в поверхностной впадине не может больше релаксировать за счет пластического сдвига и является достаточно высокой для разрыва межатомных связей. Таким образом, появляются тонкослойные разделенные участки металла, выступающие на поверхность (экструзии), а также вдавленные в нее (интрузии).

На формирование микротрещин в медной прослойке слоистой композиции большое влияние оказывает прочное соединение меди со сталью, обеспеченное сваркой взрывом, которое препятствует образованию экструзий и интрузий и существенно увеличивает сопротивление медной прослойки распространению трещины.

Задержка движения магистральной трещины при переходе из медного в стальной слой, по-видимому, связана не только с движением трещины вдоль границы медь–сталь, но и с механизмом ее зарождения в стальном слое. Для дальнейшего разрушения триметалла необходимо, чтобы трещина зародилась во втором стальном слое, что требует до-

полнительного количества циклов нагружения.

Таким образом, установлены следующие закономерности формирования зон локальной пластической деформации и движения трещины в условиях усталостного нагружения:

- 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 нагрузкой 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 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, вызванную ее ветвлением и торможением трещины у препятствия (границы раздела), и зависит от количества и свойств слоев;
- при переходе трещины из материала с более высоким модулем упругости в материал с более низким значением 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, обладающего резко отличными физико-механическими свойствами и повышенной вязкостью, приводит к повышению трещиностойкости материала.

Установленные закономерности пластического деформирования и распространения усталостных трещин в слоистых композиционных материалах, полученных сваркой взрывом, позволяют управлять формированием структуры композитов и их сопротивлением распространению трещин.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванова В. С., Терентьев В. Ф.** Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 455 с.
2. **Дидык Р. П.** Исследование возможности использования взрыва для получения биметаллических и бислойных труб: Дис... канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1965. – 221 с.
3. **Захаренко И. Д.** Сварка металлов взрывом. – Минск: Навука і тэхніка, 1990. – 204 с.
4. **Ковалевский В. Н.** Принципы создания эрозионноустойчивых слоистых композиционных материалов методами импульсного нагружения и технология производства труб для изделий новой техники: Дис... д-ра техн. наук. – Минск, 1989. – 492 с.
5. **Олишевская В. Е.** Исследование вязкости разрушения слоистых композиционных материалов. // Науковий вісник НГАУ. – 2001. – № 6. – С. 54–57.
6. **Иванова В. С.** Разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 167 с.
7. Статья на специальную тему / Н. Г. Минаев, В. Н. Ковалевский, В. Д. Харитонов, Г. И. Киселева // ЖОТ. – 1983. – № 9. – С. 12–17.
8. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: В 4 т. / Под общей ред. В. В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1988.