

СТРУКТУРА МЕТАЛЛА В ОБЪЕМЕ СОЕДИНЕНИЯ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Барахтин Б.К., Барахтина Н.Н.

ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», С.-Петербург, Россия
mail@crism.ru

Прочность сварного соединения, полученного методом трения с перемешиванием (СТП), обеспечивается адгезионным физико-химическим взаимодействием атомов, активированных пластической деформацией и высокими температурами. Сварка производилась подачей со скоростью $U = 120$ мм/мин цилиндрического инструмента, вращающегося с частотой $N = 450$ об/мин ($\omega \sim 1 - 10$ с⁻¹). Целью работы являлся анализ структурных изменений в СТП соединении листов толщиной 3 мм, изготовленных из конструкционного сплава группы магналиев (таблица).

Т а б л и ц а . Х и м и ч е с к и й с о с т а в с п л а в а

Содержание химических элементов, вес. %								
Al	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Cr	Zr	Ti
Основа	5,8	0,8	0,1	0,2	0,7	0,08	0,1	0,03

Исследование структуры СТП соединения (рис.1а) выполнено методами металлографии, результаты истолкованы с позиций трибологии.

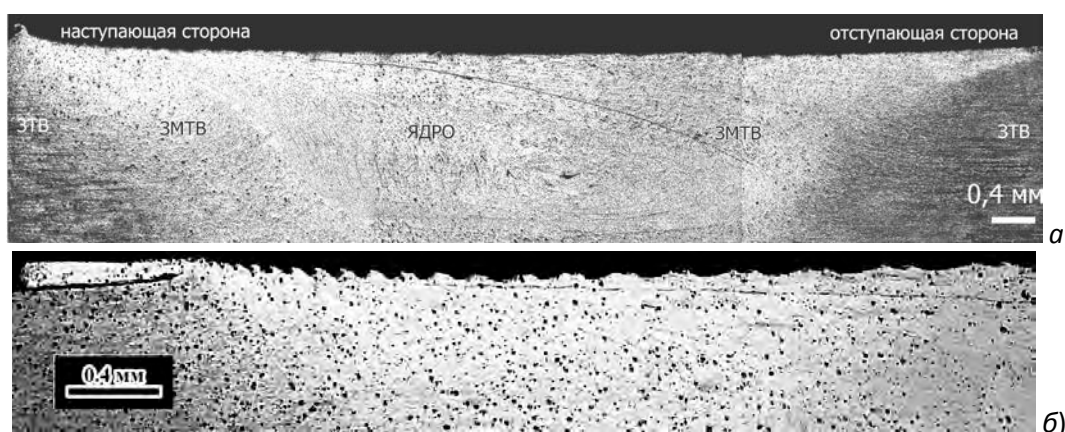


Рис.1. Общий вид структуры металла в объеме СТП с указанием характерных зон соединения (а), периодический макрорельеф на аналитическом сечении участка «наступающей» стороны (б)

На лицевой поверхности соединяемых листов зафиксирован волнообразный рельеф переменной частоты и амплитуды. На участке «наступающей» стороны по мере удаления от оси инструмента наличие рельефа (рис.1б) с возрастающими амплитудой и частотой свидетельствовали о потоках массы вещества, выходящего на поверхность наподобие прибрежных волн. Периодичность дает основание полагать, что движение и перемешивание металла осуществлялось конвекцией материальной среды с участием динамической колебательной моды. Следовательно, в формировании структуры сварного соединения принимали участие конкурирующие процессы, описание которых необходимо осуществлять с позиций кинетики или нелинейной динамики. Зафиксировано, что по мере подачи вращающегося инструмента металл начинал вовлекаться в пластическое течение в условиях растяжения с изгибом на удалении $\sim 1,5$ мм от него. Отсюда следовало, что в перемешивании металла прини-

мали участие носители пластической и ротационной моды деформации – дислокации и дисклинации.

Методом химического травления шлифов выявлена структура металла, в которой по виду деформированных зерен определены границы зон: ядра, механотермического влияния (ЗМТВ), термического влияния (ЗТВ) и основного металла (ОМ). В структуре каждой из указанных зон выявлены особенности.

Зона ядра выделяется конфигурацией следов ротационной мегапластической деформации в виде замкнутых циклических траекторий неправильной формы, которые свидетельствуют о массовом конвективном потоке деформируемого металла, восходящем к лицевой поверхности соединения. По опубликованным данным температура в СТП соединениях алюминиевых сплавов может достигать 400 °С. Строение ядра характеризуется мелкими ($1 \pm 0,5$ мкм) равноосными зернами с динамически рекристаллизованной структурой релаксационного типа как после зернограничной деформации.

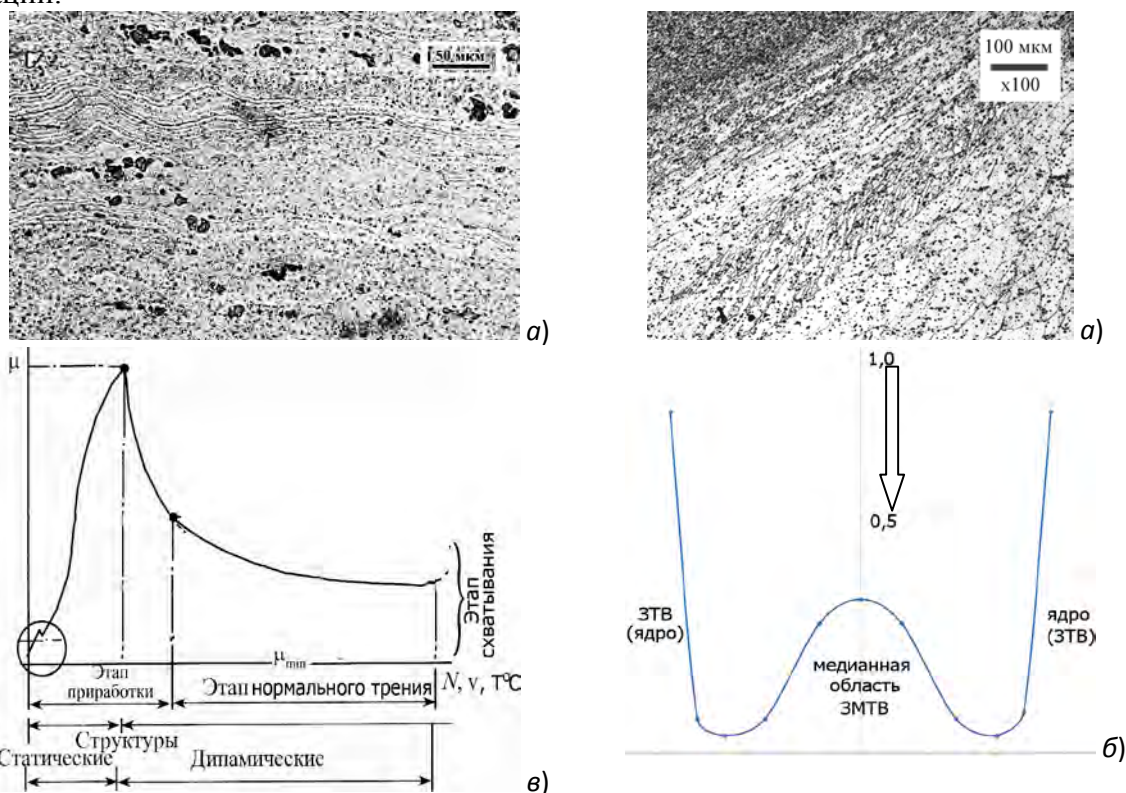


Рис.2. Структура зерен в зоне ЗМТВ в виде каналов деформации (слева) и зерна фрагментированного состояния с полосовой субструктурой (справа) (а). Стрелка указывает место фрагментированных зерен на схеме распределения параметров каналов a/b (б). Схема изменения коэффициента трения μ и типы возможных структур на разных этапах контакта трущихся поверхностей в зависимости от числа оборотов N , скорости скольжения $v = \omega R$ и температуры T в узлах трения (в)

В ядре минимальный размер зерен сопоставим с оценкой масштаба элементарной трибонаоструктуры – механического кванта структур трения. Редкие разрывы длиной до 50 мкм межзеренного типа, обнаруженные в пределах ядра, указывают на проявление микроскопического схватывания и износа, который наступает после самоорганизованного образования и распада вторичных структур трения в нанобъемах границ соприкасающихся зерен с генерацией вакансий, микротрещин и ювенильных участков. С учетом результатов структурных исследований ядра, можно полагать, что для скоростей подачи инструмента существует интервал $U_{\text{мин}} < U_{\text{опт}} < U_{\text{макс}}$, в пределах которого эффект перемешивания возможен без нарушения сплошности материала. Он означает, что $U_{\text{макс}}$ может рассматриваться как критерий, до-

статочный для появления трещины вследствие износа схватыванием. Величину $U_{\text{опт}}$ следует определить как критерий, *необходимый* для получения прочного (бездефектного) СТП соединения.

В зоне механотермического влияния (ЗМТВ) зерна сгруппированы по направлению мегапластической деформации, образуя протяженные каналы разной ширины и морфологии. В пределах ЗМТВ для произвольно выбранного медианного участка параметры каналов, представленные отношениями поперечной хорды a к продольной b , обнаруживают максимум при $a/b \sim 0,3 \pm 0,1$ (рис.2б). В области экстремума каналы деформации с равноосными рекристаллизованными зернами чередуются с каналами, внутри которых упорядоченно ориентированы субзерна полосового типа, которые начинаются и оканчиваются на границах и характерны для фрагментированного состояния. Зафиксированные особенности указывают на их деформационное происхождение с динамикой колебательного типа в коллективном взаимодействии активных мод деформации мезоскопического уровня.

По мере приближения к границам с ядром или ЗТВ значения функции распределения a/b резко устремляются к единице, что свидетельствует о формировании равноосных зерен и смене механизмов и масштабных уровней в процессах структурообразования.

В рассмотрении процессов, ответственных за СТП соединения материалов, мы исходим из положений отечественной науки о трении. С позиций трибологии реакцию металла на воздействие вращающегося инструмента можно характеризовать с помощью коэффициента трения μ и последовательности нескольких этапов структурных изменений, обусловленных числом оборотов инструмента N (степенью деформации), скоростью скольжения $v = \omega R$ и температурой T (рис.2 в).

В условиях растяжения с изгибом пластическую деформацию, которая сопровождается искривлением и вытягиванием зерен исходной (статической) структуры, можно сопоставить с этапом приработки, в течение которой коэффициент трения высок. В объемах металла, где осуществляется дробление и турбулентное перемешивание зерен и фаз, можно ожидать образование динамических (вторичных) структур неравновесного состояния, которые за счет вводимой механической энергии формируются и распадаются в трибоконтактах материальной среды.

Авторы не ставили перед собой задачу исчерпывающего анализа структурных изменений, но сочли необходимым изложить результаты наблюдений, на основании которых сформулированы следующие выводы:

1. В методе сварки трением с перемешиванием (СТП) формирование прочного соединения металлических материалов в условиях повышенных температур и конвективной мегапластической деформации реализуется физико-химическим взаимодействием атомов в форме статистических ансамблей дефектов кристаллического строения с метрикой от 0-мерного уровня (вакансии) до 3-х мерного уровня (каналированные группы зерен и микротрещины).

2. Сохранение сплошности деформируемой среды обеспечивается непрерывной самоорганизацией структурных перестроек колебательного типа с участием диссипативных структур неравновесного состояния и механизмов динамической релаксации.

3. В разработке практических технологий СТП с постоянной скоростью вращения рекомендуется оптимизация диаметра заплечиков инструмента и скорости его подачи по траектории соединения.

4. Результаты структурных исследований подтвердили ранее высказанную гипотезу о том, что фрагментированная структура деформируемого металла в состоянии предельного упрочнения является аккомодационной, характеризуется термодинамической неравновесностью и способствует накоплению латентной энергии, достаточной для активации релаксационных процессов в форме структурно-фазовых переходов.