

05.1

Природа пластического течения металлов в приконтактной зоне при сварке взрывом

© В.В. Рыбин, Э.А. Ушанова, С.В. Кузьмин, В.И. Лысак

ЦНИИ конструкционных материалов „Прометей“, Санкт-Петербург
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Волгоградский государственный технический университет
E-mail: rybin.spb@gmail.com

Поступило в Редакцию 20 июня 2011 г.

Установлена физическая природа формирования волнообразных контактных поверхностей в экстремальных условиях динамического нагружения, типичного для сварки взрывом. Показано, что подобные поверхности возникают при взаимодействии сдвиговых и ротационных мод пластического течения металла, одновременно реализующихся на микро-, мезо- и макроуровнях.

Одной из актуальных проблем современной физики прочности и пластичности является изучение элементарных механизмов пластического течения металлов и сплавов при экстремальных условиях нагружения, в частности при сварке взрывом.

Исходя из общезначимых представлений, а также из имеющихся в настоящее время разрозненных экспериментальных данных, можно полагать, что при столкновении двух кристаллических твердых тел специфика пластического течения в узкой приконтактной зоне (УКЗ) должна проявляться в наличии и совместной реализации трех (макро-, мезо- и микро-) масштабно-структурных уровней деформации [1,2]. В масштабах, соразмерных сотням и более μm (макроуровень), пластическое течение металла, помимо сдвиговых, должно включать в себя крупномасштабные ротационные моды, которые вызывают неупругое перераспределение металла вдоль фронта волны и формируют характерные вихри [3]. На мезоуровне, т.е. в масштабах, соразмерных нескольким μm , должно наблюдаться явление фрагментации [4], при котором пластическое течение должно осуществляться в основном за счет ротационно-сдвиговых процессов, локализованных на границах фрагментов. В масштабах, соразмерных с $\sim 100\text{ nm}$ (микроуровень), элементарными актами пластической деформации должны быть

трансляционные сдвиги, осуществляемые движением индивидуальных решеточных дислокаций. Задача настоящего исследования состоит в том, чтобы на одном и том же участке УКЗ: а) изучить дефектную структуру взаимодополняющими методами оптической металлографии, растровой (методом EBSD-анализа) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ); б) экспериментально доказать существование указанных структурных уровней деформации (макро-, мезо- и микро-); в) связать их между собой.

В данной работе изучали модельное соединение медь-медь, полученное сваркой взрывом по режиму: скорость соударения 500 m/s, скорость контакта 2120 m/s, угол соударения 13.4°, толщина верхней (метаемой) и нижней (неподвижной) пластин составляла 3 mm. Образцы для исследования подготавливали по специально разработанной методике, изложенной в [5].

Макроуровень. Металлографическая структура сварного шва на продольном срезе бислойной ($M1-M1$) пластины представлена на рис. 1, а. Выход поверхности контакта (ПК) на плоскость этого среза представляет собой линию с выраженной периодичностью, которую в первом приближении можно описать длиной волны $\lambda = 285 \mu\text{m}$ и амплитудой $a = 60 \mu\text{m}$. Каждый горб (выпуклость) этой волны имеет характерную форму, которую можно представить в виде шляпки „гриба“, скошенного в направлении распространения детонации (DD). Под шляпкой каждого такого „гриба“ периодически располагаются по две области оплавленного металла с характерным размером $\sim 40 \mu\text{m}$ (рис. 1, а). Очевидно, что отмеченные особенности ПК обусловлены неоднородностью пластической деформации.

Вдали от ПК (как в верхней, так и в нижней пластинах) металлографическая структура слабо отличается от исходной, типичной для хорошо отожженной меди и представляет собой агрегат, состоящий из множества двойников отжига, размеры которых составляют 15–20 μm . Слабое искажение границ двойников указывает на то, что при сварке взрывом основная часть материала пластин испытывает незначительную ($\epsilon \sim 0.1$) пластическую деформацию.

Гораздо ббольшую деформацию испытывает материал в узкой приконтактной области, непосредственно примыкающей к ПК. Ширина этой зоны $h = 180 \mu\text{m}$ примерно в 1.5 раза превышает величину $2a$. Внутри УКЗ пластическая деформация столь велика, что исходная металлографическая структура в ней кажется полностью разрушенной. Границы

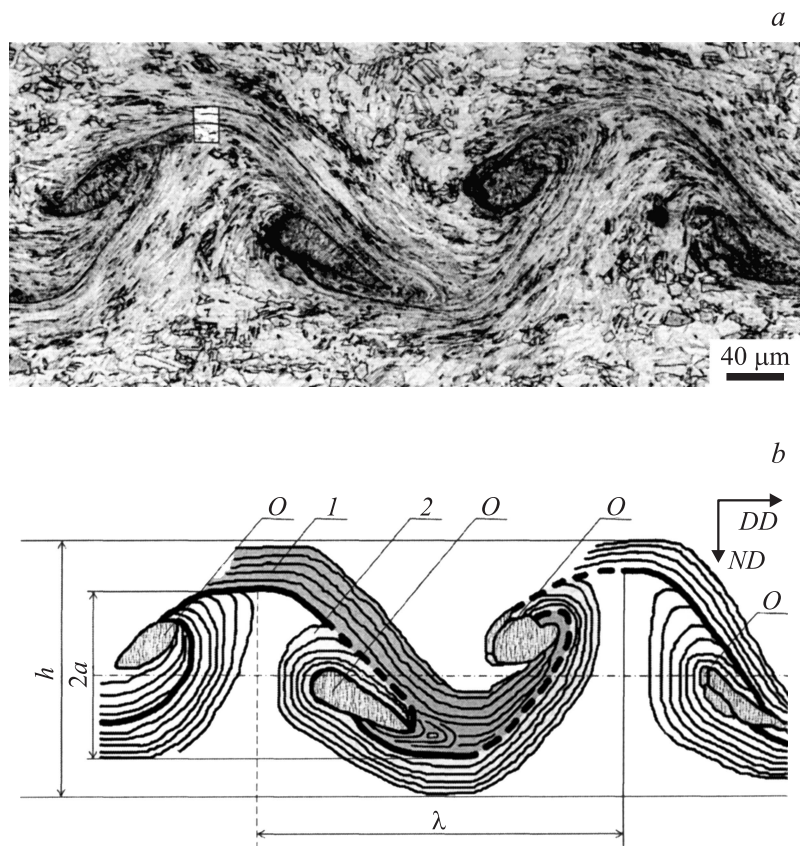


Рис. 1. *a* — металлографическая структура УКЗ на продольном срезе бислойной пластины *M1–M1* (светлым прямоугольником отмечен участок, на котором была исследована структура методом EBSD-анализа (анализа картин дифракции обратно-рассеянных электронов) и ПЭМ); *b* — схема характерного элемента структуры пластической струи (выделена тоном верхняя *1* и нижняя *2*); пунктиром отмечены участки, где линия ПК (выделена толстой линией) теряется; *O* — участок оплава; *h* — ширина УКЗ, $2a$ — высота волны, λ — длина волны; *DD* — направление детонации, *ND* — направление, перпендикулярное направлению детонации.

зерен (двойников отжига) исчезли. Наблюдаются лишь бессистемно расположенные дисперсные кристаллиты размерами 4–6 μm , которые, вероятно, представляют собой части исходных зерен (двойников отжига), размолотых в ходе интенсивной пластической деформации. При более детальном рассмотрении структуры УКЗ обнаруживается, что пластическое течение материала и внутри УКЗ происходит не однородно по его объему, а локализуется в весьма характерных протяженных областях, непосредственно прилегающих к линии ПК и повторяющих ее форму своими криволинейными траекториями. Они дискретны и имеют конечную длину, примерно равную длине волны λ ($\sim 300 \mu\text{m}$). Их ширина непостоянна и колеблется от 30 до 60 μm . Назовем эти необычные элементы макроструктуры пластическими струями.

В верхней (метаемой) пластине пластические струи зарождаются над горбом волны ПК, снижаются вдоль ниспадающей правой части „шляпки скошенного гриба“, а доходя до ее конца, разветвляются, при этом одна часть струи заворачивает под „шляпку“ и образует там вихрь (рис. 1, *b*). В центре вихря, где интенсивность пластического течения достигает максимума, тепловыделение оказывается достаточным для локального расплавления металла, о чем свидетельствуют крупнокристаллические области, появившиеся в этих местах при последующей кристаллизации. Вторая часть пластической струи выходит на восходящую ветвь следующего горба волны ПК и, поднимаясь вдоль него, образует следующий вихрь — уже под левой частью „шляпки следующего скошенного гриба“. Соответственно там образуется следующий оплав. Следующая пластическая струя в верхней пластине зарождается над следующим горбом ПК, и описанный выше процесс ее развития циклически повторяется.

В нижней (неподвижной) пластине пластические струи зарождаются под нижней частью впадины волны ПК, которые при своем образовании как бы выжимают исходный материал, и затем устремляются вверх, образуя „ножки скошенного гриба“. При этом, как видно из рис. 1, *a*, каждая „ножка“ образуется двумя струями, подошедшими от двух соседних впадин. Поднимаясь вверх и встречаясь с материалом верхней падающей пластины, эти струи растекаются в стороны, образуя при этом „шляпку скошенного гриба“. Подробное изображение описанных выше процессов представлено на схеме рис. 1, *b*.

Возникает вопрос, какова физическая природа возникновения пластических струй? Если оставаться в рамках известной модели Бахра-

ни [6] или идеологически близких к ней гидродинамических моделей (ГДМ), то обсуждаемые здесь структурные особенности нужно трактовать как визуализацию зажатых между падающей и неподвижной пластинами обратных кумулятивных струй. При этом надо иметь в виду, что само по себе зарождение и последующее развитие обратной кумулятивной струи возможно лишь в том случае, если механическое поведение металла становится аналогичным поведению жидкоподобной или аморфной среды. Следовательно, если справедливы ГДМ, то: 1) область обратной кумулятивной струи должна быть выделена четкой границей по отношению к окружающему материалу, сохраняющему в процессе совместного деформирования кристаллическое строение; 2) структура материала внутри области обратной кумулятивной струи должна нести следы процессов рекристаллизационного типа, сопровождающих превращения аморфного металла обратной кумулятивной струи при охлаждении.

Представленные экспериментальные факты показывают, однако, что это не так. Во-первых, наблюдаемые в наших экспериментах пластические струи зарождаются и заканчиваются в деформируемом материале падающей либо неподвижной пластин и не имеют выделенной границы, отделяющей их от материала той или иной пластины. Во-вторых, имеются недвусмысленные указания на то, что внутри пластических струй течение материала происходит не гомогенно, как это можно было бы ожидать для аморфного или жидкоподобного тела, а дискретно, что типично как раз для кристаллического твердого тела. Действительно, на рис. 1, а, видно, что пластические струи состоят из набора параллельных и тонких полос деформации (до 20 в каждой струе) толщиной 2–5 μm . Для того чтобы более конкретно выяснить природу этих и других особенностей строения пластических струй, необходимо перейти на мезоуровень наблюдений.

Мезоуровень. На рис. 2 представлена полученная методом EBSD карта распределения ориентировок кристаллических областей на участке пластической струи, отмеченном на рис. 1, а светлым прямоугольником. Участок расположен примерно на вершине горба ПК и захватывает материал как верхней, так и нижней пластины. Анализируя представленную карту ориентировок, следует признать, что тело пластической струи представляет собой агрегат, состоящий из множества чрезвычайно мелких, слегка вытянутых в направлении, параллельном линии ПК, кристаллитов, разориентированных на углы, в основном

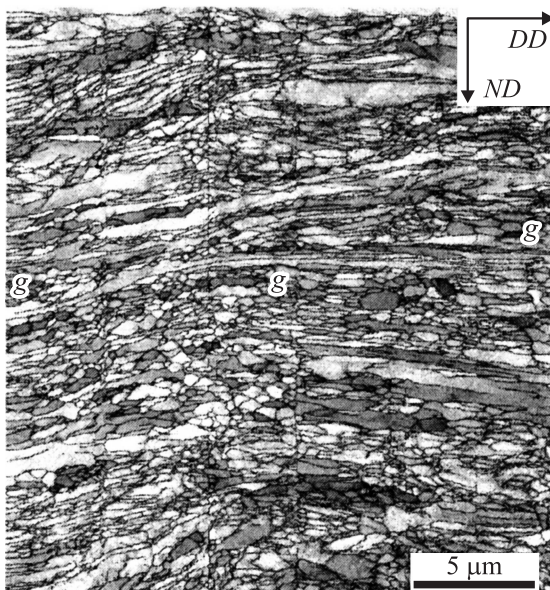


Рис. 2. Карта распределения разориентированных кристаллических микрообластей (фрагментов) внутри пластической струи (EBSD-анализ с участка, отмеченного светлым прямоугольником на рис. 1, *a*): *g-g-g* — граница между верхней и нижней пластинами.

превышающие 15° градусов (доля большеугловых разориентировок составляет 83%). Поперечные размеры кристаллитов в среднем составляют 200 nm при значении аспектного числа 0.3. Направление вытянутости параллельно линии ПК. Кристаллиты распределены не хаотично, а объединяются в полосы толщиной по 10–30 штук. Длина таких полос составляет $20\text{--}50\text{ }\mu\text{m}$. По структуре эти полосы аналогичны классическим полосам деформации [1], а по толщине, длине и направлению они соответствуют тем структурным образованиям, которые выявляются внутри пластических струй (рис. 1, *a*). Отметим также, что на карте, представленной на рис. 2, зафиксирована граница между верхней и нижней пластинами (отмечена буквами *g-g-g*). Анализируя распределение кристаллитов в окрестностях этой границы,

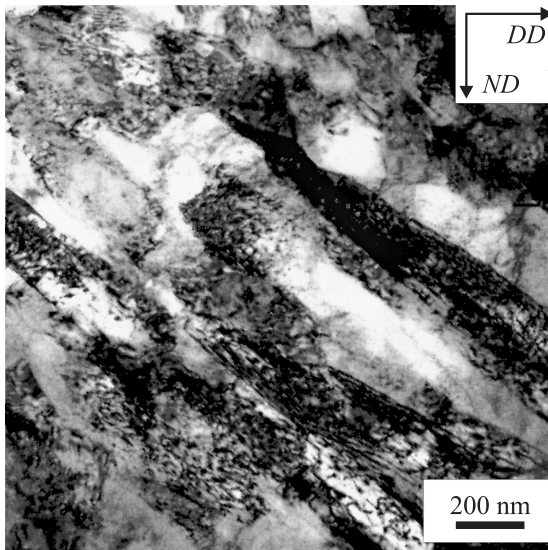


Рис. 3. Типичная фрагментированная структура внутри пластической струи при наблюдении методами ПЭМ участка, отмеченного светлым прямоугольником на рис. 1, *a*.

легко убедиться в том, что природа развития пластических струй качественно одинакова для падающей и неподвижной плит.

Вся совокупность приведенных выше рассуждений и экспериментальных фактов показывает, что при формировании пластических струй мы имеем дело с классическим явлением фрагментации кристаллов в условиях развитой (интенсивной) пластической деформации [1]. Следовательно, наблюдаемые внутри пластических струй кристаллиты есть не что иное, как сформировавшиеся при пластической деформации фрагменты, а большеугловые границы — границы не рекристаллизационного, а деформационного происхождения.

Микроуровень. Для того чтобы получить прямые доказательства того, что мы имеем дело с фрагментацией, развивающейся на определенном этапе эволюции дислокационной структуры, проанализируем строение кристаллитов, сформировавшихся внутри пластических струй,

методами просвечивающей электронной микроскопии. Обратимся с этой целью к рис. 3, на котором представлена микроструктура, типичная для изученного выше участка на рис. 1, а, 2. Она представляет собой классическую фрагментированную структуру, соответствующую поздним стадиям пластической деформации кристаллических твердых тел. Поперечные размеры фрагментов близки к $0.2 \mu\text{m}$. Они вытянуты вдоль направления пластических сдвигов. В границах фрагментов наблюдается высокая плотность дислокаций. В объеме фрагментов плотность дислокаций не превышает 10^{10}cm^{-2} . Фрагменты разориентированы относительно друг друга на углы, превышающие 15° .

Таким образом, в результате проведенных исследований впервые удалось установить физическую природу формирования волнообразных контактных поверхностей в экстремальных условиях динамического нагружения, типичного для сварки взрывом. Показано, что такие поверхности возникают в условиях сложного иерархического соподчинения сдвиговых и ротационных мод пластического течения металла, одновременно реализующихся на микро-, мезо- и макроуровнях.

Список литературы

- [1] Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986. 224 с.
- [2] Панин В.Е. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Новосибирск: Наука, 1990. 226 с.
- [3] Гринберг Б.А., Иванов М.А., Рыбин В.В. и др. // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 12. С. 27–35.
- [4] Рыбин В.В. // Вопросы материаловедения. 2002. № 1 (29). С. 11–33.
- [5] Ушанова Э.А., Нестерова Е.В., Петров С.Н., Рыбин В.В., Кузьмин С.В., Гринберг Б.А. // Вопросы материаловедения. 2011. № 1 (65). С. 110–117.
- [6] Bahrani A.S. // Proceeding of Royal Society. Series A. Mathematical and Physical Sciences. 1967. V. 296. № 1445. P. 123–136.