

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Колубаев Е.А.^{1,2}

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия (634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4), e-mail: ek@ispms.ru

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия (634050, г. Томск, проспект Ленина, 30)

В статье обсуждаются особенности процесса сварки трением с перемешиванием. Проводится анализ основных механизмов формирования структурного состояния материала, подвергнутого воздействию интенсивной пластической деформации и температуры. При исследовании механизмов формирования структуры сварного соединения предлагается использовать подходы, описывающие поведение металлов и сплавов, подвергающихся термомеханическому воздействию в процессе трения скольжения. При технологическом внедрении СТП в отраслях экономики важной задачей является исследование механизмов и выявление физических закономерностей формирования структурного состояния и факторов, приводящих к образованию структурных неоднородностей и несплошностей в металле при одновременном интенсивном пластическом деформировании и термическом воздействии, которым материал подвергается в зоне формирования сварного соединения в процессе сварки трением с перемешиванием. Обладая знаниями о механизмах формирования структурного состояния в зоне шва и околошовной зоне и о причинах возникновения дефектов в конкретном материале и их связи с условиями термомеханического воздействия можно целенаправленно управлять параметрами сварки для получения бездефектных сварных соединений, полученных современным и экономически выгодным способом сварки.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, фрагментированная структура, сверхпластичность.

DISTINCTIONS OF STRUCTURE FORMING OF WELDED JOINTS PRODUCED BY FRICTION STIR WELDING

Kolubaev E.A.^{1,2}

¹Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia (634021, Tomsk, pr. Akademicheskii, 2/4)

²National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, pr. Lenina, 30)

In this paper the characteristics of the process of friction stir welding are discussed. The analysis of the basic mechanisms of the structural state in the material after being exposed to severe plastic deformation and temperature. In the study the formation mechanisms of the structure of the welded joint is proposed to use approaches that describe the behavior of metals and alloys, subjected to thermo-mechanical effects in the process of sliding friction. Implementation of FSW technology in sectors there is an important task to study the mechanisms and identify the physical laws and the formation of the structural state of the factors leading to the formation of structural inhomogeneities and discontinuities in the metal during intensive plastic deformation and thermal stresses to which the material is exposed in the area of welded joint formation during friction stir welding. Having knowledge about the mechanisms of formation of the structural state in the weld zone and heat affected zone and the causes of defects generation in material and their connection with the terms of the thermomechanical effect can be selectively controlled welding parameters to produce defect-free welded joints produced by modern and cost-effective way of welding.

Keywords: friction stir welding, fragmented structure, superplasticity.

Введение

Сварка трением с перемешиванием (СТП, Friction stir welding – FSW) является сравнительно новой технологией, впервые предложенной в СССР [3] и реализованной в современном виде в 1991 г. в Институте сварки (TWI, Cambridge, United Kingdom) [10]. Основой данной технологии является трение вращающегося инструмента цилиндрической

формы между двух соединенных торцами или внахлест пластинами металла (рис.1). В результате трения скольжения осуществляется фрикционный нагрев и массоперенос металла, которые характерны для трения скольжения металлических материалов. В этом случае температура и напряжения в поверхностных слоях металлов, примыкающих к инструменту, приводят к формированию деформированного слоя путем фрагментации исходной структуры и движения трехмерных структурных элементов (фрагментов) по схеме «сдвиг+поворот». Дополнительным фактором, обеспечивающим перемешивание материалов и образование прочного соединения двух пластин, является вращение инструмента.

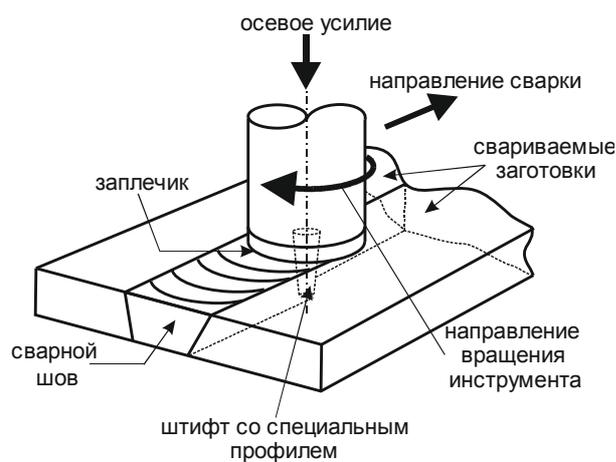


Рис.1. Схематичное изображение процесса сварки трением с перемешиванием

Преимуществом метода СТП по сравнению с обычными методами сварки можно считать отсутствие расплава при сварке трением и дефектов, обусловленных затвердеванием жидкого металла. Поскольку процесс осуществляется при температуре ниже температуры плавления, в сварных деталях практически отсутствуют искажения и поковки. Сварка трением с перемешиванием успешно применяется при соединении различных металлов и сплавов: алюминия, титана, меди и стали, но наибольшее распространение получила при сварке конструкций из алюминия и алюминиевых сплавов.

За рубежом процесс сварки трением с перемешиванием в последние годы применяется в судостроении, вагоностроении, автомобилестроении, в ракетно-космической и авиационной отраслях. Постоянно растущий список пользователей СТП включает крупные компании и организации Boeing, Airbus, Eclipse Aviation Corporation, NASA, ВМС США, Mitsubishi, Kawasaki, Alstom LHB GmbH, а также другие промышленные предприятия в США, Европе, Китае и Японии. В авиационно-космической промышленности США с помощью сварки трением с перемешиванием изготавливаются крупные отсеки для ракет и спутников из высокопрочных алюминиевых сплавов. В авиационной промышленности применение СТП позволяет отказаться от большого количества заклепок и крепежей, что

обеспечивает значительный рост производительности. Кроме того, повышается прочность соединений и усталостная прочность. В Европе производители железнодорожного подвижного состава используют этот процесс для изготовления крупных панелей, полученных сваркой алюминиевых профилей. В настоящее время ряд железнодорожных компаний – Alstom, CAF, Angel Trains, HSBC Rail и «RSSB» участвуют в совместном проекте с целью расширить применение сварки трением с перемешиванием в железнодорожной отрасли. На данный момент времени традиционная технология изготовления корпусов ракет, применяемая в космических державах, основана на использовании электродуговой сварки толстых пластин, после которой требуется фрезерование для получения вафельной структуры пластин, обеспечивающей прочность и малый вес изделия. В отличие от традиционного метода сварку трением с перемешиванием применяют фирмы Boeing и Space X (США), сваривая тонкие листы металла с последующим привариванием к корпусу ребер жесткости.

В настоящее время наблюдается отставание России от ведущих мировых держав в освоении технологии сварки трением с перемешиванием в отраслях промышленности, где данный метод позволит повысить производительность труда и обеспечить экономию металла. В России наиболее успешно данный метод применяется на ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель», где метод СТП используется при изготовлении автомобильных полуприцепов-цистерн из алюминиевого сплава. Разработка и внедрение технологии фрикционной сварки корпусных конструкций ракет-носителей из алюминиевых сплавов ведется в Государственном космическом научно-производственном центре имени М. В. Хруничева. В Пермском национальном исследовательском политехническом [2] и Донском государственном техническом университетах [4] проводятся работы по освоению и внедрению в промышленности метода СТП. Для российской промышленности освоение сварки трения с перемешиванием создает такие возможности, которые технологически и экономически открывают большие возможности при использовании в авиакосмической, железнодорожной и других отраслях. В Государственной программе Российской Федерации «Космическая деятельность России на 2013–2020 годы» предусматривается решение задач, среди которых указана задача – «создание научно-технического и технологического задела для разработки перспективных образцов ракетно-космической техники». В соответствии с данной программой крупнейшие Российские космические корпорации ОАО РКК «Энергия» и ФГУП «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева» в своих перспективных инновационных проектах рассматривают, в том числе и сварку трением с перемешиванием как перспективную технологию при изготовлении корпусов новых ракет. Вместе с тем в настоящее время в России отсутствуют нормативные

документы, регламентирующие требования к структурно-фазовым и физико-механическим характеристикам сварных соединений, полученных методом СТП, что является тормозящим фактором при внедрении данной технологии в промышленности.

На сегодняшний день нет однозначных критериев образования качественного сварного соединения при СТП. Для формулирования таких критериев необходимо всестороннее изучение механизмов формирования структуры материала, в том числе структурных неоднородностей и несплошностей, в зоне сварного соединения. Такие критерии можно сформулировать только в результате многостороннего исследования структуры и свойств сварных соединений различными методами.

Методика проведения исследований

Исследования проводили на разрушенных в процессе испытаний на растяжение образцах алюминиево-магниевого проката, толщиной 35,0 мм, сваренного способом сварки трением с перемешиванием. Микроструктуру разрушенных образцов изучали методами оптической металлографии с помощью металлографического микроскопа НЕОРНОТ-21.

Результаты и обсуждение

Сварной шов, полученный сваркой трением с перемешиванием, как правило, свободен от недостатков, присущих обычным соединениям, полученным методами плавления металла. Это обусловлено характером массопереноса материала в результате фрикционного взаимодействия инструмента и контактирующего с ним металла. В процессе сварки трением с перемешиванием отсутствует расплав металла и вызванные его затвердеванием дефекты в виде дендритной структуры, усадочных раковин, непроваров, шлаковых включений, скоплений газовых пор и др.

Среди специалистов, занимающихся сваркой трением с перемешиванием, не существует однозначного мнения о механизмах формирования сварного шва металлов в твердом состоянии. В большинстве работ анализируется макро- и микроструктура материала шва, обсуждается кругообразное течение материала, обусловленное геометрией вращающегося инструмента. Существует также мнение, что массоперенос металла в зоне шва осуществляется подобно тому, как это происходит при экструзии [8], когда цилиндрический слой материала одной из пластин, смещаясь под действием сил трения, вытесняет слой материала другой пластины. В результате образуется макроструктура, подобная «луковым кольцам». Есть и другие объяснения формирования луковичной структуры, но они не раскрывают истинного механизма образования слоистой структуры.

Наиболее достоверным объяснением формирования слоистой структуры при сварке трением с перемешиванием может служить подход, принятый при рассмотрении трения скольжения металлов [7]. Поверхностный слой материала вблизи поверхности при сухом

трении с высокими нагрузками испытывает точно такое же воздействие, какому подвергается зона сварного соединения при сварке трением с перемешиванием. Механический контакт с контртелом ведет к фрикционному разогреву поверхности, разупрочнению и интенсивной пластической деформации материала в стесненных условиях. Вследствие диссипации энергии при пластическом деформировании происходит интенсивное тепловыделение в объеме материала, что приводит к еще большей его пластификации. При этом в условиях сверхпластичности, формируются приповерхностные слои со структурой и свойствами, отличающимися от свойств основного материала [6]. В работе [19] обсуждается механизм образования слоистой структуры и образование дефектов на границе раздела основного металла и слоя течения. Основной причиной образования слоев является конкуренция процессов деформационного упрочнения и разупрочнения, обусловленного фрикционным нагревом и теплом, вызванным деформированием. В результате этого образуется слой металла с одинаковой степенью деформации, тогда как на его границе с нижележащим материалом имеет место минимальное значение предела текучести, что приводит к пластическому сдвигу всего слоя относительно основы. Вышеописанный процесс повторяется многократно – деформирование сопровождается упрочнением материала на границе раздела и выделением тепла, что приводит к образованию и сдвигу нижележащего слоя. Таким образом, толщина деформированного слоя возрастает скачкообразно с большой скоростью. Характерная структура поверхностного слоя, образованная путем последовательного локального сдвига слоев материала при трении скольжения металлов, показана на рисунке 2 и в целом аналогична той, которая наблюдается при сварке трением с перемешиванием (рис. 3). Однако особенности пластического течения металла в процессе СТП создают предпосылки для образования дефектов строения сварного шва. Некоторые дефекты на границе раздела сварного шва и основы аналогичны тем, которые образуются при трении скольжения в результате несовместности деформаций граничного слоя и основного материала [9], но встречаются и такие, которые вызваны особенностями массопереноса металла в процессе СТП, обусловленными геометрией инструмента и технологическими параметрами.

В зоне термомеханического влияния и «ядре» шва, помимо нагрева и интенсивной пластической деформации, наблюдаются процессы динамической рекристаллизации. Особенно это касается «ядра» шва, которое представляет собой динамически рекристаллизованный материал. Плотность дислокаций здесь ниже, чем в зоне термомеханического влияния, зерна близки к равноосным, а их размер значительно меньше, чем в исходном материале [5].

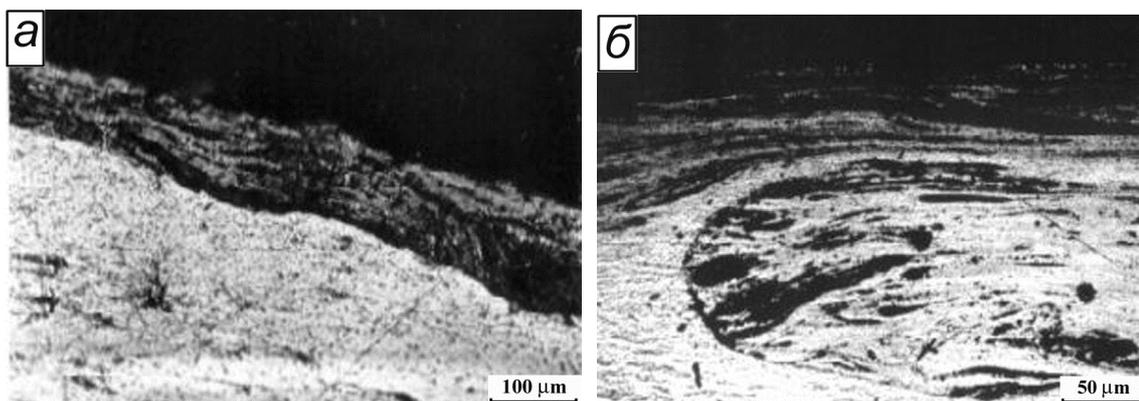


Рис. 2. Поперечное сечение образцов сплава 36НХТЮ (а) и меди (б) после испытаний [1]

В структуре швов, получаемых при СТП, выделяется три зоны, в которых структура и свойства материала отличаются от исходных. Самая удаленная от линии стыка – зона термического влияния. В процессе сварки материал в ней не деформируется, но микроструктура эволюционирует вследствие цикла нагрев – охлаждение и, соответственно, меняются свойства материала.

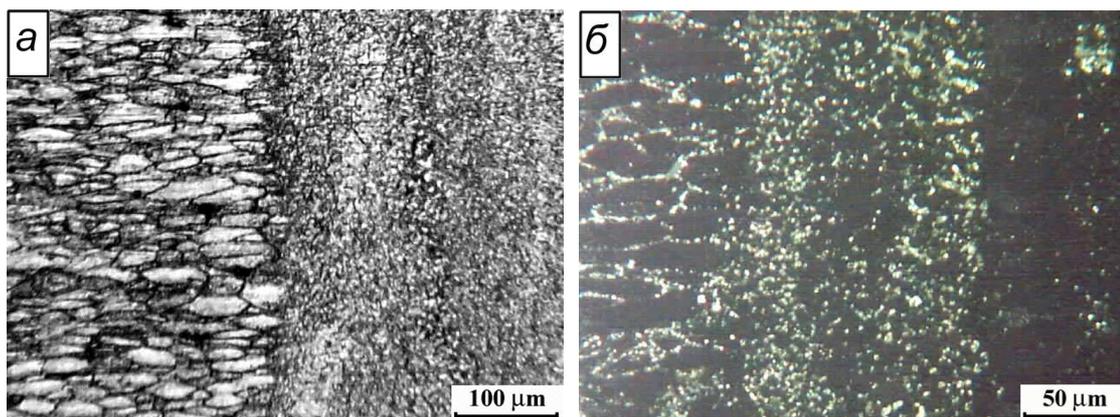


Рис. 3. Микроструктура границы основной металл – сварной шов после травления (а-светлопольное изображение, б-изображение в поляризованном свете)

Характерными дефектами, появление которых обусловлено самим механизмом СТП, являются несплошности материала, связанные с его неполным или недостаточным механическим перемешиванием в «ядре» и в зоне термомеханического влияния. Такие дефекты проявляются в виде несплошностей, пустот, внутренних границ раздела с концентрацией на них окислов. Они могут иметь различный размер и располагаться как в объеме материала, так и выходить на поверхность. Дефекты такого типа снижают длительную прочность, усталостную и коррозионную стойкость соединения. Местом зарождения дефектов другого типа – микротрещин, являются границы между основным материалом и зоной термического влияния, а также между микроструктурными зонами

внутри шва. Микротрещины могут распространяться как по нормали к линиям раздела, так и вдоль них, снижая усталостную прочность.

Заключение

Размер деформируемой зоны, степень и скорость перемешивания материала, температурный режим, размеры и особенности формируемой в зоне шва микроструктуры, а следовательно, и процессы образования дефектов определяются свойствами исходного материала, а также параметрами технологического процесса СТП. Поэтому при технологическом внедрении СТП в отраслях экономики важной задачей является исследование механизмов и выявление физических закономерностей формирования структурного состояния и факторов, приводящих к образованию структурных неоднородностей и несплошностей в металле при одновременном интенсивном пластическом деформировании и термическом воздействии, которым материал подвергается в зоне формирования сварного соединения в процессе сварки трением с перемешиванием. Обладая знаниями о механизмах формирования структурного состояния в зоне шва и околошовной зоне и о причинах возникновения дефектов в конкретном материале и их связи с условиями термомеханического воздействия можно целенаправленно управлять параметрами сварки для получения бездефектных сварных соединений, полученных современным и экономически выгодным способом сварки.

Работа выполнена по Проекту III.23.2.1 «Разработка научных основ создания мультимодальных функциональных материалов и покрытий триботехнического назначения на основе динамики контактирования поверхностей» и при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0063) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218.

Список литературы

1. Износ в парах трения как задача физической мезомеханики / В.Е. Панин, А.В. Колубаев, А.И. Слосман и др. // Физ. мезомех. – 2000. – Т. 3, № 1. – С. 67–74.
2. Карманов В.В. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов: Сущность и специфические особенности процесса, особенности структуры сварного шва / В.В. Карманов, А.Л. Каменева, В.В. Карманов // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2012. – № 32. – С. 67-80.
3. Клименко Ю.В. Способ сварки металлов трением. Авторское свидетельство № 195846 (приоритет от 09.11.65 г.).
4. Котлышев Р.Р. Расчет температур при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов/ Р.Р. Котлышев, К.Г. Шучев, А.В. Крамской // Вестник ДГТУ. – 2010. – Т. 10, № 5. – С. 648-654.

5. Мурашкин М.Ю. Особенности структуры и механические свойства алюминиевого сплава 1570, подвергнутого интенсивной пластической деформации кручением / М.Ю. Мурашкин, А.Р. Кильмаметов, Р.З. Валиев // Физика металлов и металловедение. – 2008. – Т. 106, № 1. – С. 93-99.
6. Рубцов В.Е. Одномерная модель неоднородного сдвига при трении скольжения / В.Е. Рубцов, С.Ю. Тарасов, А.В. Колубаев // Физ. мезомех. – 2012. – Т. 15, № 4. – С. 103-108.
7. Kato H. Friction-induced ultra-fine and nanocrystalline structures on metal surfaces in dry sliding/ H. Kato, M. Sasase, N. Suiya // Tribology International. – 2010. – Vol. 43. – P. 925-928.
8. Krishnan K.N. On the formation of onion rings in friction stir welds // Materials science and engineering: A. – 2002. – Vol. 327, no. 2. – P. 246-251.
9. Tarasov S. Subsurface shear instability and nanostructuring of metals in sliding / S. Tarasov, V. Rubtsov, A. Kolubaev // Wear. – 2010. – Vol. 268, no. 1-2. – P. 59-66.
10. Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Templesmith P., and Dawes C.J., G.B. Patent Application No. 9125978.8. (1991).

Рецензенты:

Поляков В.В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной физики, электроники и информационной безопасности, декан физико-технического факультета, г. Барнаул.

Плотников В.А., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики, г. Барнаул.