

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Миронова Сергея Юрьевича на тему: «Механизмы пластической деформации и эволюция микроструктуры при обработке металлов трением с перемешиванием» по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Диссертационная работа Миронова С.Ю. посвящена исследованию особенностей пластического течения и формирования микроструктур в металлических материалах при обработке трением с перемешиванием (ОТП).

Актуальность избранной темы

Технология ОТП была разработана в начале 90-х годов прошлого века как принципиально новый способ сварки твердых тел. Высокие служебные свойства сварных соединений, получаемых посредством ОТП, а также относительная простота данного метода привели к его широкому практическому использованию в транспортной индустрии, в частности в авиакосмической промышленности. В свою очередь, бурное развитие этой технологии обусловило потребность в более глубоком понимании этого процесса.

Характерной особенностью ОТП является то, что материал в зоне обработки подвергается очень большим неоднородным деформациям при высоких температурах и скоростях деформации. В настоящее время поведение материалов при столь экстремальной комбинации деформационных условий является малоизученным. В этой связи изучение процессов пластического течения и структурообразования в ходе ОТП позволяет расширить рамки современных представлений о деформационном поведении металлов и, таким образом, способствует дальнейшему развитию физики прочности и пластичности. Кроме того, понимание базовых закономерностей этих процессов дает возможность, целенаправленно изменяя режимы ОТП, управлять кристаллографической текстурой и микроструктурой обрабатываемого материала с целью повышения его физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик. В этой связи актуальность данной диссертационной работы не вызывает сомнений.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Результаты, выводы и основные положения, выносимые на защиту, имеют высокую степень обоснованности, заключающуюся во всестороннем анализе исследуемой проблемы и сравнении результатов с литературными источниками по данной теме, проведением исследований с участием нескольких хорошо

зарекомендовавших себя методов и методик и анализа большого объема статистически значимых результатов экспериментов.

Новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Данная диссертационная работа представляет собой одно из первых систематических исследований процесса структурообразования при ОТП. В ходе её выполнения микроструктурный и текстурный анализ был осуществлен на 20 различных металлических материалах, характеризующихся различными кристаллическим строением (ГЦК, ОЦК и ГПУ решетки), энергией дефекта упаковки (от ~ 160 мДж/м² в чистом алюминии до ~ 20 мДж/м² в аустенитной стали и латуни) и фазовым составом (однофазные материалы и сплавы, испытывающие аллотропные фазовые превращения в ходе обработки). Исследования проводились как на поликристаллических, так и на монокристаллических материалах. Для аттестации разориентированных структур и кристаллографических текстур применялась передовая методика автоматического анализа картин дифракции обратно-рассеянных электронов (EBSD).

Научная новизна работы заключается в следующем.

(1) Посредством систематического анализа различных конструкционных материалов доказано, что кристаллографическая текстура, образующаяся в результате ОТП, как правило близка к идеальной текстуре простого сдвига. В некоторых случаях, однако, возможно также формирование текстур рекристаллизации. В ГЦК-металлах уменьшение энергии дефекта упаковки (ЭДУ) ведет к изменению кристаллографической текстуры от $B/\bar{B}\{112\}\langle 110\rangle$ к $A/\bar{A}\{111\}\langle 110\rangle$. В металлах с ОЦК решеткой выявлено преимущественное формирование текстуры типа $D_2(11\bar{2})[111]$. В ГПУ-металлах формируемая текстура является чувствительной к соотношению c/a . В частности, в магниевых сплавах преобладает аксиальная базисная текстура типа $\{0001\}\langle uv\bar{t}w\rangle$, обусловленная базисным скольжением, а в α титане - текстура типа $P_1\{1\bar{1}00\}\langle 11\bar{2}0\rangle$, связанная с призматическим скольжением. При ОТП магниевых сплавов обнаружено образование исключительно сильной текстуры, максимальная интенсивность которой может до 50 раз превышать уровень фона.

(2) В результате систематического микроструктурного анализа различных материалов показано, что эволюция зеренной структуры в ходе ОТП представляет собой сложный процесс, который обычно включает в себя геометрический эффект деформации, фрагментацию и рекристаллизацию по прерывистому механизму. В некоторых материалах также возможна дополнительная активация механического двойникования, формирование двойников отжига и конвергенция зерен. Преобладание того или иного механизма зависит как от природы материала, так и от температуры ОТП.

В частности, при обработке кубических металлов с высокой ЭДУ доминирующую роль в эволюции микроструктуры играет фрагментация. Показано, что формирование границ деформационного происхождения в ходе этого процесса тесно связано с образованием кристаллографической текстуры, а плоскости их залегания близки как к плоскостям макроскопического сдвига, так и кристаллографическим плоскостям скольжения.

При ОТП ГЦК-металлов с относительно низкой энергией дефекта упаковки основным механизмом структурообразования является прерывистая рекристаллизация. Показано, что рекристаллизационные зародыши новых зёрен преимущественно формируются по механизму образования зернограничных «язычков». В ходе этого процесса зародыши наследуют кристаллографическую ориентировку приграничных районов деформированной матрицы.

В материалах с промежуточной величиной ЭДУ возможен переход от фрагментации к прерывистой рекристаллизации при повышении температуры обработки.

В ходе ОТП гексагональных металлов эволюция зеренной структуры очень тесно связана с формированием кристаллографической текстуры. В частности, образование очень острой текстуры в зоне перемешивания ведет к частичной конвергенции кристаллографических ориентировок соседних зерен.

(3) На примере титанового сплава ВТ6 и феррито-мартенситных сталей доказано, что фазовые превращения, протекающие в ходе ОТП, характеризуются наличием небольших, но систематических отклонений от идеальных ориентационных соотношений. Посредством EBSD-реконструкции микроструктур высокотемпературных фаз установлено, что данный эффект связан с формированием развитой деформационной субструктуры. Показано, что низкотемпературная фаза, образующаяся в результате фазового превращения, наследует кристаллографическую текстуру простого сдвига высокотемпературной фазы.

(4) Установлено, что аномальный рост зерен, имеющий место в ходе отжига материалов, подвергнутых ОТП, тесно связан с макроскопической неоднородностью микроструктуры внутри зоны обработки. Показано, что аномальный рост зерен в алюминии, подвергнутом ОТП, может вести к формированию текстуры рекристаллизации.

Достоверность полученных результатов, выводов

Достоверность результатов диссертации обеспечена использованием современных и апробированных методов исследований. В частности:

(1) применением нескольких независимых способов микроструктурного анализа, таких как оптическая металлография, растровая и просвечивающая электронная микроскопия и

ориентационная микроскопия посредством автоматического анализа картин дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD),

(2) многоуровневом анализом микроструктуры, включающим в себя качественную и количественную металлографию, исследование спектра разориентировок и кристаллографической текстуры,

(3) значительной статистикой анализируемых параметров зеренной структуры (до нескольких десятков тысяч зерен).

(4) непротиворечивой интерпретацией экспериментальных результатов на основе современных представлений и моделей деформационного поведения металлических материалов.

Достоверность результатов подтверждается также высоким уровнем апробации работы. Основное содержание диссертации отражено в 94 публикациях, из них 53 статьи опубликовано в ведущих зарубежных изданиях и изданиях, включенных в перечень ВАК, Результаты работы докладывались на многочисленных всероссийских, иностранных и международных конференциях и симпозиумах и хорошо известны научной общественности.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов.

Рекомендации по их использованию

Результаты, полученные в диссертации, вносят существенный вклад в научные представления о закономерностях деформационного поведения материалов в условиях экстремально больших деформаций, высоких температур и скоростей деформации.

Практическая значимость работы обусловлена возможностью применения результатов исследования для оптимизации процесса ОТП широкого класса металлических материалов и управления формирующейся в них микроструктурой и кристаллографической текстурой. Кроме того, в ходе работы был разработан ряд оригинальных методик, которые могут быть использованы для углубленного анализа процессов формирования кристаллографических текстур и микроструктур в ходе деформации, рекристаллизации, роста зерен и фазовых превращений.

Достоинства в содержании и оформлении диссертации

В качестве достоинств работы можно отметить следующее

1) широкое использование современной ориентационной микроскопии посредством автоматического анализа обратно рассеянных электронов (EBSD). Многочисленные преимущества этого метода микроструктурного анализа позволили провести научное исследование на качественно новом уровне.

2) большое разнообразие исследованных материалов. Данный подход позволил установить общие закономерности деформационного поведения материалов в ходе ОТП, а также выявить влияние типа кристаллической решетки и ЭДУ на этот процесс.

3) установление взаимосвязи различных аспектов структурообразования в материалах, деформируемых в условиях ОТП– изменения морфологии и размеров зерен, эволюции ансамбля границ деформационного происхождения и формирования кристаллографической текстуры.

3) диссертация прекрасно оформлена , содержит незначительное количество опечаток, написана хорошим научным языком.

Недостатки в содержании и оформлении диссертации

Замечания и пожелания к работе:

1. Известно, что закономерности формирования структур деформационного происхождения существенно зависят как от характеристик материала, так и от режимов деформирования и величины пластической деформации. Поэтому при сопоставлении морфологических и кристаллографических особенностей структурных состояний, сформировавшихся в условиях ОТП в различных микроструктурных регионах обрабатываемого материала, было бы весьма полезно иметь представление о том, при каких величинах внешнего напряжения, скорости и степени деформации формируется структура в этих областях. К сожалению, в диссертации такие сведения, как правило, отсутствуют, приведены лишь технологические режимы ОТП. Как следствие, при сопоставлении структур деформационного происхождения в различных микроструктурных регионах автору диссертации приходится говорить лишь об относительно больших или относительно малых значениях указанных величин. Это, конечно, снижает информативность проведенного исследования и затрудняет сравнение полученных результатов с результатами исследований закономерностей структурообразования при других технологических схемах деформирования (например, при интенсивной пластической деформации кручением).

2. Из текста диссертации остаётся неясным что понимает автор под такими выражениями как "материал, захваченный инструментом в ходе ОТП" и "осаждение материала внутри зоны ОТП". Какие физические процессы происходят при "захвате" и "осаждении" материала? Испытывает ли материал с момента его "захвата" до момента "осаждения" пластическую деформацию?

3. В работе представлены экспериментальные функции распределения границ деформационного происхождения по разориентировкам (ФРО) . В работах Хансена и Хьюза и в последующих работах Рыбина и соавторов для математического

описания ФРО в фрагментированных структурах, формирующихся при многих других схемах деформирования, было предложено использовать гамма распределение. На наш взгляд, было бы целесообразно провести математическую обработку приведённых в диссертации данных с целью анализа применимости этого распределения для описания структур, формирующихся в условиях ОТП. В зависимости от результатов анализа можно было бы, на наш взгляд, сделать выводы о сходстве или различии механизмов структурообразования при ОТП и других схемах и режимах интенсивного пластического деформирования.

4. В качестве пожелания дальнейшего развития работы можно порекомендовать разработку количественных моделей эволюции микроструктуры и текстуры материалов в ходе ОТП.

Общая характеристика работы.

Отмеченные недостатки не влияют на положительную оценку работы в целом.

Диссертация Миронова Сергея Юрьевича выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу. На основании осуществленных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Таким образом, диссертационная работа соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а её автор заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент,
Зам. директора по науке ИПМ РАН
Доктор физико-математических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки РФ
Перевезенцев Владимир Николаевич


(подпись)

Тел.: +7 (831) 432-23-40
Факс: +7 (831) 465-61-71
E-mail: pevn@uic.nnov.ru
Адрес: 603024, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, 85

Подпись В.Н. Перевезенцева заверяю
Ученый секретарь ИПМ РАН





И.С. Павлов