

## 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

### Актуальность темы диссертации

Физика больших (интенсивных) пластических деформаций, создание на этой основе новых материалов и технологий их обработки – важное направление современного материаловедения. Одна из таких технологий - обработка трением с перемешиванием (ОТП). В настоящее время она нашла применение в качестве принципиально нового метода сварки металлических материалов в твердом состоянии. Высокие служебные свойства получаемых при этом сварных соединений привели к ее широкому практическому использованию.

Особенностью этой технологии являются чрезвычайно сложные условия внешних воздействий - предельные степени, высокие скорости и температуры деформации, в том числе, в процессе перемешивания разнородных материалов. Очевидно, что дальнейшее развитие ОТП невозможно без понимания физических процессов формирования микроструктуры и служебных свойств материала в этих условиях. Между тем, несмотря на почти 30-летний опыт интенсивного исследования больших пластических деформаций, вопросы физики пластической деформации в указанных выше экстремальных условиях обработки разработаны слабо.

Как видно, проводимое в диссертации исследование, направленное на выявление механизмов пластической деформации и эволюции микроструктуры в процессе ОТП широкого класса металлических материалов, позволяет, во-первых, выявить новые физические закономерности деформационного поведения этих материалов в экстремальных условиях деформации; во-вторых, существенно расширить возможности технологий ОТП.

Таким образом, тема диссертации С.Ю. Миронова представляет собой интерес, как с научной, так и с практической точек зрения, и ее актуальность не вызывает сомнений.

### Новизна проведенных исследований и полученных результатов

В работе проведено систематическое исследование основных закономерностей эволюции микроструктуры в ходе ОТП в условиях сварки металлических материалов в твердом состоянии. Выявлены общие и специфические особенности и механизмы структурообразования в различных металлических материалах и условиях деформации. Привлекательными особенностями проведенного исследования, определившими научную новизну полученных результатов, являются, во-первых, использование широкого спектра металлических материалов, различающимся типом кристаллической



решетки (ГЦК, ОЦК, ГПУ), энергией дефекта упаковки (от  $\approx 160$  до  $\approx 20$  мДж/м<sup>2</sup>), уровнем фазовой нестабильности и температурой плавления. Во-вторых, проведение исследований на разных структурных уровнях с привлечением современных методов структурного анализа, в том числе, оригинальных специально разработанных методов дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD).

К числу наиболее важных результатов, имеющих существенную научную новизну, можно отнести:

(1) Выявлены закономерности формирования кристаллографической текстуры в процессе ОТП широкого класса металлических материалов. Среди них: 1 - ее близость к идеальной текстуре простого сдвига; 2 - закономерности изменения в зависимости от типа кристаллической решетки и энергии дефекта упаковки; 3 - высокая чувствительность к соотношению  $c/a$  в ГПУ материалах; 4 - образование исключительно сильной (в 50 раз выше уровня фона) текстуры при ОТП магниевых сплавов.

(2) Установлены основные механизмы деформации и переориентации кристаллической решетки в процессе эволюции зеренной структуры в ходе ОТП, которая, наряду с геометрическим эффектом, включает фрагментацию кристаллической решетки, рекристаллизацию по прерывистому механизму, механическое двойникование, образование двойников отжига и конвергенцию зерен. Показано, что относительная роль этих механизмов, наряду с типом кристаллической решетки и температурой обработки, определяется энергией дефекта упаковки. В кубических кристаллах при высоких значениях этой величины доминирующую роль в эволюции микроструктуры играет механизм фрагментации. В процессе ее уменьшения или повышения температуры обработки наблюдается переход к прерывистой рекристаллизации. В ГПУ металлах эволюция зеренной структуры тесно связана с формированием острой кристаллографической текстуры, приводящей к частичной конвергенции кристаллографических ориентировок соседних зерен в зоне перемешивания.

(3) С использованием методов EBSD-реконструкции микроструктур высокотемпературных фаз показано, что в структурно нестабильном титановом сплаве и ферритно-мартенситных сталях формирующиеся в процессе обработки низкотемпературные фазы наследуют деформационную текстуру высокотемпературной фазы и характеризуются развитой деформационной субструктурой, приводящей к небольшим, но систематическим отклонениям от идеальных ориентационных соотношений.

(4) Установлено, что аномальный рост зерен в процессе отжига подвергнутых ОТП материалов тесно связан с макроскопической неоднородностью микроструктуры в зоне обработки и является важным фактором формирования текстуры рекристаллизации.

### **Степень обоснованности и достоверности научных результатов и выводов**

Обоснованность и достоверность научных результатов и выводов, полученных в диссертации, определяются, во-первых, высококвалифицированным использованием современных методов структурных исследований, включающих в себя качественную и



количественную металлографию, исследование спектра разориентировок и кристаллографической текстуры методами дифракции обратно рассеянных электронов со значительной (до нескольких десятков тысяч зерен) статистикой анализируемых параметров зеренной структуры. Во-вторых, интерпретацией экспериментальных результатов на основе современных представлений и моделей деформационного поведения металлических материалов.

О высокой достоверности полученных результатов свидетельствуют также их апробация на различных международных научно-технических конференциях и публикации в 94 научных трудах, включая 53 статьи в ведущих зарубежных изданиях и изданиях, включенных в перечень ВАК.

### **Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и практики**

Научная значимость результатов заключается в выявлении новых физических закономерностей, общих и специфических особенностей структурообразования в широком классе металлических материалов в условиях высоких степеней, температур и скоростей деформации. Эти результаты представляют собой значительный вклад в решение фундаментальных проблем физики пластической деформации в указанных выше экстремальных условиях внешних воздействий.

Практическая значимость результатов исследования обусловлена возможностью их применения для целенаправленного формирования необходимых параметров микроструктуры в процессе ОТП, оптимизации технологий этой обработки и существенного расширения возможностей таких технологий для широкого класса металлических материалов. Кроме того, ряд разработанных в диссертации оригинальных методик (EBSD)-анализа могут быть успешно использованы для углубленного анализа процессов структурообразования в практике научных исследований.

### **Замечания по диссертационной работе в целом**

По работе можно сделать следующие замечания и пожелания дальнейшего развития исследований:

1) Чрезвычайно интересным было бы провести сравнительный анализ выявленных в диссертации закономерностей с наблюдаемыми при других динамических способах нагружения, например, сварке взрывом или динамической интенсивной пластической деформации. К сожалению, в работе такой анализ отсутствует.

2) Недостаточно внимания уделено в работе и исследованию (или анализу с привлечением литературных данных) влияния режимов обработки и особенностей формирующейся при этом микроструктуры на физико-механические свойства сварных соединений. В работе такой анализ ограничен лишь результатами исследования микротвердости.

3) Продолжение исследований по тематике диссертационной работы требует, на наш взгляд, привлечения просвечивающей электронной микроскопии - наиболее




информативного метода аттестации микроструктуры на более низком, по сравнению со сканирующей электронной микроскопией, масштабном уровне.

### Общая характеристика диссертационной работы

В целом, несмотря на сделанные замечания, представленная диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему и имеющую важное научное значение. На основании выполненных автором исследований получена совокупность научных результатов, которые 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,  
заведующий лабораторией физики структурных  
превращений Федерального  
государственного бюджетного учреждения  
науки Института физики прочности  
и материаловедения Сибирского отделения  
Российской академии наук, доктор  
физико-математических наук, профессор

  
А.Н. Тюменцев  
18.05.2016

634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4,  
тел.: (382-2) 53-15-69, (382-2) 22-50-15,  
факс: (382-2) 49-25-76,  
e-mail: tyuments@phys.tsu.ru

Подпись А.Н. Тюменцева удостоверяю,  
ученый секретарь Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Института физики  
прочности и материаловедения  
Сибирского отделения Российской академии  
наук, доктор технических, доцент



  
В.С. Плешанов