

## ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертационную работу Томчука Александра Александровича «ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ В СПЛАВЕ FeNi ПРИ МЕГАПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ КРУЧЕНИЕМ ПОД ВЫСОКИМ КВАЗИГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».**

В диссертационной работе А.А. Томчука различными экспериментальными методами изучены закономерности формирования структуры и свойств (механических, магнитных, термодинамических) магнитно-мягкого эквиатомного сплава железо – никель (50Н), а так же чистого железа при различных режимах мегапластической деформации кручением под высоким квазигидростатическим давлением в (КВД) камере Бриджмена.

Актуальность исследования обусловлена тем, что ультрамелкозернистые материалы, полученные воздействием интенсивной пластической деформации (или мегапластической деформации, МПД) проявляют уникальные физические и механические свойства, и потенциально интересны для практического применения во многих областях техники и медицины. Методом МПД, позволяющим достичь наиболее высоких степеней деформации на образцах, является кручение под высоким квазистатическим давлением. В настоящее время проблеме влияния КВД на структуру металлов и сплавов посвящено большое число статей в ведущих научных журналах, как в России, так и за рубежом. Однако требуется дополнительные исследования для все более глубокого

понимания закономерностей физических процессов, протекающих в материалах при МПД. Крайне мало данных о влиянии непрерывного и дробного характера деформации, реверсивного кручения в условиях камеры Бриджмена. Интересным и принципиально важным для понимания природы процессов, происходящих при МПД, является анализ влияния больших деформаций на процессы динамической кристаллизации и фрагментации, и их конкуренции на различных стадиях МПД. Безусловно, интересным является исследование влияния МПД на магнитные параметры экваторного сплава железо – никель, являющегося известным и широко применяющимся магнитно-мягким материалом. Указанные вопросы поднимаются и глубоко исследуются в представленной работе, в связи, с чем диссертационная работа А.А. Томчука, несомненно, актуальна и своевременна.

Для достижения поставленных целей в работе были решены следующие задачи:

1. Проведение деформационных экспериментов в камере Бриджмена, при варьируемых значениях величин МПД (числе полных оборотов подвижной наковальни  $N$ ), для поликристаллических образцов сплава FeNi и технически чистого  $\alpha$ -Fe при комнатной температуре и при постоянных значениях скорости деформирования и гидростатического давления.

2. Проведение деформационных экспериментов в камере Бриджмена, при варьируемых значениях дробных деформаций и направлений кручения, для поликристаллических образцов технически чистого  $\alpha$ -Fe, при постоянном значении общей величины МПД и при постоянстве температуры и скорости деформации, а также при постоянном значении квазигидростатического давления.

3. Проведение детального анализа эволюции дефектной структуры и уровня внутренних напряжений, после различных режимов МПД в камере Бриджмена, образцов сплава FeNi и  $\alpha$ -Fe.

4. Определение термодинамических параметров сплава FeNi, после различных режимов МПД в камере Бриджмена.

5. Проведение детального анализа эволюции магнитных свойств (намагниченность насыщения и коэрцитивная сила), механических свойств (микротвердость) и термодинамических свойств (химический потенциал и энергия Гиббса), сплава FeNi, после различных режимов МПД.

6 Проведение детального анализа эволюции дефектной структуры и механических свойств, в образцах сплава FeNi, после различных режимов термической обработки.

7. Разработка, на основании использованных в работе дифракционных и спектроскопических методов исследования, моделей структурообразования, способная корректно объяснить наблюдаемые в сплаве FeNi и технически чистом  $\alpha$ -Fe особенности изменения магнитных и механических свойств в ходе МПД и последующей термической обработки.

8. Рассмотрение предложенных моделей структурообразования при МПД, в сплаве FeNi и в технически чистом  $\alpha$ -Fe, в рамках предложенной ранее общей концепции описания МПД, как открытой синергетической системы и существования в ней дополнительных каналов диссипации механической энергии.

Обоснованность и достоверность научных результатов положений, выводов обеспечена постановкой актуальных задач исследования, использованием целого комплекса взаимодополняющих методов исследования, использованием современной приборной аналитической базы, тщательной статистической обработкой экспериментальных результатов, сравнением полученных результатов с данными других авторов. Полученные результаты проанализированы на основе современных представлений физики металлов, и представлены непротиворечивые объяснения полученных результатов.

Экспериментальные исследования, проведенные А.А. Томчуком., дают возможность глубже понять особенности структурных превращений, протекающих в сплавах Fe-Ni, а также в чистом Fe при воздействии МПД по различных режимам.

Научная новизна работы состоит в следующем: 1. Предложена модель «двухфазной смеси», описывающая структурообразование, при МПД Fe и FeNi, как совокупность процессов деформационной фрагментации и низкотемпературной динамической рекристаллизации, циклически сменяющих друг друга. 2. Систематизированы и оценены вклады релаксационных процессов, происходящие под действием больших пластических деформаций на разных этапах в Fe и в сплаве FeNi. 3. Впервые экспериментально выявлены эффекты упорядочения и ближнего расслоения, в экваторном сплаве железо - никель, под действием ИПД. Обнаружены уникальные явления повышения намагниченности насыщения на некотором этапе деформационной обработки в камере Бриджмена. 4. Проведены уникальные исследования влияния дробных и реверсивных деформаций в камере Бриджмен, и установлено разнонаправленное влияние на структуру альфа-железа дробных неревверсивных и реверсивных деформаций кручения. 5. Обнаружено, что процесс первичной рекристаллизации, при отжиге сплава FeNi после МПД, сопровождается ростом ранее возникших при деформации рекристаллизованных зерен с поглощением деформационных фрагментов.

Научная и практическая значимость результатов диссертации заключается в следующем.

Предложена модель «двухфазной смеси», состоящей из деформационных фрагментов и динамически рекристаллизованных зёрен, которая корректно описывает закономерности формирования структуры однофазных сплавов Fe-Ni на разных стадиях МПД.

Показано, что образование в структуре материала, в ходе МПД, большой объемной плотности высокоугловых границ зерен обусловлено, главным образом, протеканием процессов динамической рекристаллизации.

Показано, что основным фактором релаксации упругой энергии, при мегапластической деформации сплава FeNi, является низкотемпературная динамическая рекристаллизация, активно протекающая при комнатной температуре и значительных величинах пластических деформациях ( $N \geq 1$ ).

Показано, что термодинамическая устойчивость сплава FeNi, после определенных режимов МПД, не только не снижается относительно менее деформированного состояния, но даже несколько возрастает.

Показано, что дробность и направление кручения, при мегапластической деформации в камере Бриджмена при комнатной температуре, оказывает заметное влияние на характер структуры и механические свойства технически чистого  $\alpha$ -Fe.

Обнаруженное в работе аномальное повышение намагниченности насыщения, при некоторых режимах деформационной обработки, представляет практический интерес и может быть использовано для создания магнитно-мягких материалов, с уникальным сочетанием высоких магнитных и механических свойств.

По диссертации имеются следующие *замечания*.

В разных разделах обозначение  $n$  используется для обозначения различных величин. Так, на рис. 3.8. –ось  $x$  - « $n$ » указано без пояснения в подрисуночной подписи, что означает  $n$  на данном рис. В предыдущем разделе  $n$  означало общее число оборотов наковален, которым подвергнут образец. Только из текста раздела диссертации следует, что в данном разделе и на рисунке 3.8.  $n$  -означает величину дробного цикла деформирования, тогда как общее число оборотов наковален, которым подвергнуты образцы на рис 3.8 составляет 2. То же для рисунка 3.9.. тоже в автореферате. Использование одного обозначения ( $n$ ) для

обозначения разных величин затрудняет восприятие читателем результата.

Из раздела методики не совсем ясна методика подсчета «среднего значения  $H_V$ » образцов, подвергнутых МПД с разным  $n$ . Из рис. 2.3 ясно, что распределение  $H_V$  вдоль радиусов образцов оценивалось измерениями в точках, указанных на рис. Но не указано, как считалось средняя  $H_V$  по образцу. В связи с неоднородностью деформации по радиусу и соответственно  $H_V$  брать за среднее  $H_V$  значение, полученное усреднением по всем точкам МПД образцов, видимо не корректно. В целом глава 3 анализирует изменение параметров структуры в точках на расстоянии 2 мм от центра ИПДК образцов, и было бы логично на рис 2.4 отражать изменение среднего  $H_V$  так же в точках на расстоянии 2 мм от центра МПД образцов.. Отмечу, на рис. 3.10 для образца с  $n = 2$  (т.е. без дробности)  $H_V$  на расстоянии 2 мм от центра составляет около 5.7 ГПа – и достигает 6.7 ГПа только на краю образца. В тоже время рис. 3.4 для образца  $n= 2$  «среднее»  $H_V$  составляет около 6.7 ГПа. Отсюда можно понять, что на рис. 3.4 представлено «среднее»  $H_V$  для краевых точек МПД образца? Но это в работе не указано.

Рисунок 6.4. – Изменение микротвёрдости  $H_V$  после различных режимов МПД и термической обработки сплава 50Н. Видно, что  $H_V$  сплава 50Н после МПД по различным режимам очень значительно уменьшается при термической обработке до 300°C (на стадии отдыха). Так, для состояния  $n=4$   $H_V$  с исходных 7,5 ГПа падает до 4.8 ГПа (на 35%), тогда как при повышении  $T$  отжига от 400° до 500°C – (т.е. на этапе начала кристаллизации)  $H_V$  уменьшается с 4,8 ГПа до 3.8 – на 20 % - , т.е. заметно меньше, чем на стадии отдыха. Отсюда в величине  $H_V$  значительный вклад, видимо, вносят дислокации (возможно как в теле, так и в границах зерен), исчезающие на стадии отдыха, и применять к МПД состоянию "комбинированный" законом Холла – Петча без учета

плотности дислокаций и их изменения при росте  $n$ , видимо, не совсем корректно.

Для объяснения уменьшения параметра кристаллической решетки FeNi после МПД  $n=1$  автор предлагает фактор «высокого давления». «Известно [125], что высокое гидростатическое давление приводит к некоторому снижению параметра кристаллической решетки». Однако это относится скорее к параметру кристаллической решетки материала непосредственно в условиях высокого давления. В данной работе РСА исследования проводились после МПД и, соответственно, после снятия высокого давления, т.е. при атмосферном давлении.

Но в целом высказанные замечания не снижают ценности представленной работы. Работа представляет большой научный интерес. Диссертант, безусловно, выполнил очень большой объем работы, использовал целый набор оригинальных методов и подходов. В частности, можно отметить оригинальность подхода исследований дробных реверсивных и нереверсивных деформаций, Большой интерес представляет результаты использованного автором оригинального метода измерения термодинамических параметров (химический потенциал компонентов сплава FeNi) методом мгновенного фиксирования электродвижущей силы (ЭДС). Данный метод практически не применялся в известных мне многочисленных статьях по подвергнутым ИПД металлическим материалам, хотя он позволяет получить данные о их внутренней энергии.

Содержание диссертации и основные выводы соответствуют поставленной цели и задачам исследования. Текст диссертации оформлен в соответствии с действующими требованиями. *Достоверность* работы подтверждается многочисленными публикациями автора в российских и зарубежных журналах, апробацией

на российских и международных конференциях. По теме диссертации опубликованы 9 работ в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, включая ведущие российский журналы в области физики металлов и материаловедения. Опубликованные по теме диссертации работы, полностью раскрывают ее содержание и основные результаты.

### ***Заключение***

Диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором на высоком научном уровне. Она написана доходчиво, грамотно и аккуратно оформлена. По каждой главе и работе в целом сделаны четкие выводы. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа отвечает критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Томчук Александр Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07– Физика конденсированного состояния.

Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 01.04.07. – «Физика конденсированного состояния»:

п.1. Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления.

п.3. Изучение экспериментального состояния конденсированных веществ (сильное сжатие, ударные воздействия, изменение гравитационных



полей, низкие температуры), фазовых переходов в них и их фазовые диаграммы состояния.

Ведущий научный сотрудник  
лаборатории физики твердого тела  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Института физики молекул и кристаллов  
Уфимского научного центра Российской  
академии наук, доктор физико-  
математических  
наук

Гундеров Дмитрий Валерьевич

27.09.2017

450075, г. Уфа, пр. Октября, 151. +7 (3472) 734449, dimagun@mail.ru  
Согласен на обработку персональных данных.

Подпись Гундерева Д.В.  
Специалист по кадрам



Специалист по кадрам Окшина Ж.В.