ОТЗЫВ
официального оппонента на диссертационную работу
Даниловой Лидии Владиславовны
«Автоволновые процессы деформации Людерса и Портевена-Ле Шателье»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертации. Еще в конце прошлого столетия в мировом научном сообществе сложилось понимание, что в виду чрезвычайной сложности явления пластического формоизменения создать единую теорию на базе существующих подходов не удается. Как справедливо указывает автор рецензируемой работы, два основных подхода: макро- и микроскопический в настоящее время разошлись слишком далеко и развиваются практически независимо. При этом каждый из них демонстрирует несомненные успехи в своей области. Феноменология макроскопического подхода в достаточной степени обеспечивает технологическую практику обработки материалов давлением, а микроскопический подход дает добротное физическое обоснование для определения критических точек деформационных кривых, например, критического напряжения сдвига в монокристаллах. Попытки объединить эти подходы, чтобы создать единую теорию были предприняты в работах В.Е. Панина, В.А. Лихачева, В.И. Владимирова, Е.Э. Засимчук и других посвященных многоуровневости пластического течения. В развитие этого направления Э.В. Козловым и Н.А. Коневой была создана концепция эволюции субструктур деформационных дефектов. Эти и ряд других исследований определили продуктивность использования идей синергетики, как объединяющего начала между микро- и макроскопическими подходами к описанию пластического течения. Один вариантов синергетического описания пластической деформации является автоволновой подход, который развивается под руководством Л.Б. Зуева в лаборатории физики прочности ИФПМ СО РАН. Успешность его в настоящее время доказана для материалов самых различных классов, имеющих диаграммы деформации без особенностей, когда коэффициент упрочнения меняется монотонно, оставаясь положительным вплоть до начала формирования шейки разрушения. В то же время явления нижнего и верхнего пределов текучести, площадки текучести, прерывистой текучести оставались вне рамок автоволновой концепции, что вызывало определенные сомнения в универсальности последней. По этой причине работа Даниловой Л.В., посвященная исследованию деформации Чернова-Людерса и Портевена-Ле Шателье в рамках автоволнового подхода является актуальной и своевременной.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, выводов и списка цитированной литературы. Общий объем диссертации 127 страниц, включая 37 рисунков и 4 таблицы. В списке цитированной литературы 208 источников.

Во введении дано общее описание диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и значимость, практическая значимость и четыре защищаемых положения.

Первый раздел представляет собой краткий, но достаточно полный литературный обзор сложившихся к настоящему времени физических представлений о дислокационной природе пластической деформации. Описаны базовые положения дислокационного подхода, и отмечена сложность проблемы, связанная с неаддитивностью вкладов дефектов на разных стадиях, с эффектами неравновесности и нелинейности деформируемой среды. Показано, что без учета этих обстоятельств описание основных закономерностей пластической деформации невозможно. Проанализированы попытки учесть эффекты открытости и активности деформируемых объектов на базе представлений А. Зегера и В. Франка о деформации, как процессе структурообразовании, когда явления, протекающие на микро-, мезо- и макроуровнях взаимообусловлены. На

ИФПМ СО РАН
«04» ФЕВ 2022 201__г.
вх. № 0402 22/2
индекс

этом основании обоснована целесообразность применения понятий и аппарата теории неравновесных систем при разработке теории пластической деформации, как согласующей макро- и микроскопические подходы.

В конце раздела сформулированы и проанализированы базовые положения автоволновой концепции пластичности, ее современное состояние и перспективы, оценена возможность адекватного описания конкретных явлений пластической деформации, в том числе и неустойчивостей пластического течения Чернова-Людерса и Портевена-Ле Шателье.

Во втором разделе приведено описание используемых материалов, размеров и формы образцов, предварительных термомеханических обработок, экспериментального оборудования и методических процедур. Выбор материалов обоснован существованием в них неустойчивостей Чернова-Людерса или(и) Портевена-Ле Шателье. Перед основной частью исследований проводилась аттестация структурного состояния в основном методами оптической микроскопии. В аустенитно-мартенситной трип-стали содержание магнитной фазы до и после деформирования контролировалось ферритометром. Прецизионные детали фазового превращения в этом материале выявлялись с помощью атомно-силовой микроскопии. Механические испытания на одноосное растяжение в широком интервале скоростей нагружения дополнены методиками цифровой регистрации эволюции полей деформаций. Анализ этих полей позволял выявлять очаги локализации пластической деформации и исследовать их кинетику. Получаемая количественная информации подвергалась статистической обработке.

Третий раздел посвящен исследованию пространственно-временных закономерностей деформации Чернова-Людерса. Автор показывает, что помимо традиционных низко концентрированных ОЦК твердых растворов внедрения, где данная неустойчивость пластического течения обусловлена взаимодействием дислокаций с атмосферами Коттрелла, она может развиваться в материалах с памятью формы в сверхэластичном состоянии. Причем, независимо от механизма реализации пластичности на микроскопическом уровне формируются движущиеся фронты локализованной макроскопической деформации, кинетические закономерности которых едины. Эти фронты переводят деформируемый объект из метастабильного упруго напряженного в стабильное пластически деформированное состояние, то есть представляют собой автоволны переключения в бистабильной среде. Установлена и объяснена нелинейная зависимость скоростей автоволн переключения от скорости деформирования. Результатами данного раздела обоснованы первое и второе положения вынесенные на защиту.

В четвертом разделе представлены исследования пространственно-временных закономерностей деформации Портевена-Ле Шателье. На примере стареющего сплава Al-Cu-Mg-Mn показано, что здесь также развиваются процессы локализации на макроскопическом уровне в виде подвижных деформационных фронтов. Однако при внешнем подобии с фронтами Чернова-Людерса фронты Портевена-Ле Шателье не могут двигаться навстречу друг другу, а потому не аннигилируют. Они многократно пробегают по образцу с постоянными скоростями на фоне деформационного упрочнения вплоть до образования шейки вязкого разрушения.

Деформации по моделям Людерса и Портевена-Ле Шателье не исключают друг друга. Автор рассматривает последовательную смену этих неустойчивостей в трип-стали, где на деформационной кривой сначала формируется площадка текучести, а затем участок скачкообразной деформации. Здесь вначале возникают множественные фронты Чернова-Людерса, которые заметают рабочее поле образца, аннигилируют друг с другом и разбивают образец на деформационно независимые зоны. При повышении деформирующего напряжения на границах этих зон зарождаются фронты Портевена-Ле Шателье, движущиеся только пределах зон.

Пятый раздел посвящен сравнительному анализу деформаций Людерса и Портевена-Ле Шателье и обсуждению их с автоволновых позиций. Автор отмечает, что обе неустойчивости соответствуют участкам диаграмм напряжение-деформация, где коэффициент упрочнения принимает отрицательные значения. На указанных участках происходит прорастание узких зародышевых полос через все поперечное сечение образца и дальнейшее движение фронтов (границ) этих полос. Общим для кинетики движения фронтов, как в случае деформации Людерса, так и в случае деформации Портевена-Ле Шателье является постоянство их скоростей. Автор, полагая движение деформационных фронтов термически активируемым, показывает, как исходя из общепринятых дислокационных моделей процессов микросдвигов на фронтах Чернова-Людерса и Портевена-Ле Шателье, может быть обеспечено постоянство скоростей.

Основное различие кинетики фронтов Чернова-Людерса и Портевена-Ле Шателье, состоящее в способности первых аннигилировать при встрече и однократно проходить по деформируемому объекту, и периодическому движению по образцу вторых, объясняется различием активных среды, формирующихся при этом. Для фронтов Чернова-Людерса это бистабильная среда со временем рефрактерности много больше времени эксперимента. Здесь время рефрактерности контролируется диффузией примесных атомов внедрения. Поэтому фронты Чернова-Людерса суть автоволны переключения. Фронтам Портевена-Ле Шателье соответствует возбудимая активная среда, у которой время рефрактерности меньше времени эксперимента, потому что контролируется временами пробега дислокаций между барьерами в виде упрочняющих частиц. Поэтому фронты Портевена-Ле Шателье за время эксперимента многократно проходят по деформируемому объекту и представляют собой автоволну возбуждения. В разделе 5 представлены непротиворечивые количественные оценки времен рефрактерности для обоих случаев.

Автор также рассматривает физические причины нелинейной зависимости скорости фронтов Чернова-Людерса от скорости деформирования и механизм реализации перехода от деформации Людерса к деформации Портевена-Ле Шателье. Результаты раздела 5 обосновывают третье и четвертое положения вынесенные на защиту.

Научная новизна, обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научная новизна работы заключается в том, что:

- подтверждена применимость автоволновой концепции пластического течения к объяснению деформаций Людерса и Портевена-Ле Шателье;
- обнаружена новая автоволновая мода – автоволна возбуждения локализованной пластичности, которая реализуется при прерывистой деформации Портевена-Ле Шателье;
- установлены автоволновые критерии реализации деформаций Людерса и Портевена-Ле Шателье в виде времен рефрактерности, определяемых микромеханизмами пластического течения.

Достоверность результатов и обоснование выводов обеспечивается использованием современных апробированных экспериментальных методов, интерпретацией полученных результатов на основе существующих положений физической (дислокационной) теории пластичности; критическим анализом и сравнением полученных данных с приведенными в литературе сведениями о закономерностях пластического течения в материалах разной природы; использованием при необходимости в ходе обработки экспериментальных данных методов математической статистики, в частности, при оценке параметров зависимости скорости автоволн переключения от скорости внешнего воздействия.

Результаты диссертационных исследований достаточно полно представлены в 9 статьях опубликованных в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов ВАК РФ и в 8 статьях в изданиях, включенных в библиографические базы данных цитирования Web of Science.

Теоретическая значимость и практическая ценность результатов работы

Теоретическая значимость работы Л.В. Даниловой состоит в том, что установлена согласованность микроскопических и макроскопических закономерностей деформационного поведения материалов на участках кривой течения с отрицательным значением коэффициента деформационного упрочнения при деформации Людерса и Портевена-Ле Шателье. На этом основании предложен механизм генерации автоволн переключения и возбуждения при пластической деформации структурно неустойчивых металлических материалов. В рамках существующих микроскопических теорий пластической деформации проведены оценки времен рефрактерности бистабильной и возбудимой активных сред, формирующихся при деформациях Людерса и Портевена-Ле Шателье, соответственно.

Практическая ценность результатов диссертации обусловлена тем, что установленные в ней закономерности эволюции автоволновых мод, прослеженные при механических испытаниях теплостойких сталей, обнаруживают ускорение темпа перехода к заключительной стадии предразрушения в зависимости от степени деградации материала в процессе эксплуатации. Это обстоятельство может быть использовано при разработке методов оценки остаточного ресурса теплоэнергетического оборудования.

Замечания:

1. При определении времен рефрактерности бистабильной и возбудимой активных сред автор использует уравнения 5.3 и 5.4, в которые входят микроскопические параметры: плотность дислокаций, расстояние между ними и между упрочняющими интерметаллидными частицами. Эти параметры взяты из литературных данных и являются весьма приблизительными. Следовало бы аттестовать дислокационную субструктуру изучаемых материалов и определить необходимые данные экспериментально.
2. Как можно понять из параграфа 4.2 раздела 4, микромеханизм деформации в трип-стали и на площадке текучести, и при скачкообразной деформации один и тот же – мартенситное $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение. Почему при этом меняется тип автоволны?
3. Автор определяла ферритометрическим методом содержание магнитной фазы только в исходных образцах после различных обжатий при теплой прокатке (таблица 4.1). Количественных данных о накоплении мартенсита в процессе механических испытаний нет. Они могли бы быть получены не только путем магнитных измерений, но и другими методами структурных исследований.
4. Автор заявила в качестве экспериментальной методики измерения микротвердости, однако результаты таких измерений в диссертации отсутствуют.

Сделанные замечания не снижают, в целом, положительной оценки диссертации и не ставят под сомнение защищаемые положения и основные выводы.

Содержание диссертации соответствует пунктам 1 и 6 паспорта специальности 1.3.8. – физика конденсированного состояния.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Заключение

Научный уровень решаемых задач, объем и актуальность выполненных исследований, обоснованность вынесенных на защиту положений, достоверность, научная новизна и значимость полученных результатов для науки практики дают основание считать, что диссертация Даниловой Л.В. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные результаты

доказывающие, что деформации Людерса и Портевена-Ле Шателье являются автоволновыми модами локализованной пластичности. Диссертация удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук согласно п. II.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г (в редакции от 11.09.2021 г.). Автор диссертационной работы Данилова Лидия Владиславовна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук
(специальность 01.04.07 – Физика
конденсированного состояния), доцент,
заведующий кафедрой физики, химии и теоретической механики
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Томский государственный архитектурно-строительный университет»,
634003, Томская обл., г. Томск, пл. Соляная, 2
Телефон: +7 (3822) 63-40-03
j_sol@mail.ru

С обработкой персональных данных согласен.

Соловьева Юлия Владимировна
«2» февраля 2022 г.

Подпись Ю. В. Соловьевой заверяю
Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО ТГАСУ

Елугачев Павел Александрович