

Б. К. КЕНЖАЛИЕВ, А. А. ПРЕСНЯКОВ, Г. Г. КУРАПОВ, А. С. ДЕГТЯРЕВА,  
Н. Н. МОФА, Т. В. ЧЕРНОГЛАЗОВА, Э. Н. СУЛЕЙМЕНОВ

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ КАК РЕЗУЛЬТАТ НЕРАВНОВЕСНОГО ДЕФОРМАЦИОННО-СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛ

(Представлена академиком НАН РК Е. Е. Ергожиным)

Приводятся основные данные об открытии явления протекания пластического течения металлов (материалов) в строго локализованных областях, в которых вещество находится в неравновесном переходном состоянии и связанных с этим явлением характеристиках пластического течения.

В научно-технической литературе уделялось [1] и уделяется [2] большое внимание процессу пластической деформации металлов и сплавов. Анализ литературы по исследованиям и практике использования пластической деформации в производстве различных изделий показывает, что пластическая деформация, в частности, металлов и сплавов, сопровождается разнообразными физическими проявлениями. Например, в [3] приведены результаты исследования акустической эмиссии, которая возникает при деформации металлов. В [4] показаны некоторые закономерности изменения теплопроводности чистых металлов, в частности, меди и серебра, при их пластической деформации. Результаты исследований характера проводимости металлов и изменения их электросопротивления под влиянием деформации приведены в [5], при этом автор работы связывает полученные зависимости с электронным строением металлов. Эксперименталь-

но установленный факт электронной эмиссии при деформации металлов с гранецентрированной кубической решеткой опубликован в [6]. Имеется более чем достаточное количество опубликованных работ, в которых показано изменение физических свойств металлов при повышении нагрузки при деформации, возникновение твердотельных реакций при деформации металлов, наличие волновых процессов при пластической деформации, влияние параметров деформируемого тела на характер и течение деформации, возникновение фазовых переходов при деформации металлов и др. [например, 7–12]. Также имеется достаточно большое количество публикаций по наличию аналогичных физических проявлений при деформации и других механических воздействиях на соединения металлов [например, 13, 14].

Анализ научно-технической литературы и собственные экспериментальные данные в области структурных преобразований в конденсированных

системах под влиянием различных видов энергии привел к следующему заключению. Наличие различных физических и химических процессов при пластической деформации позволяет провести аналогию между деформацией и процессами, протекающими при различных химических реакциях. Обобщение всех этих сведений позволяет **рассматривать деформацию металлов под влиянием механической энергии как разрушение (или ослабление) связи между атомами и молекулами металлов (и других веществ), которое имеет все особенности химических процессов.**

Экспериментально было показано, что в ходе деформации в структуре металла наблюдается фазовый переход, вследствие чего в зоне единичного импульса пластической деформации мы имеем структуру, полученную в результате перекристаллизации. Поскольку в течение единичного импульса происходят прямой и обратный фазовые переходы, то часть материала остается в виде высокотемпературной фазы. Уменьшение размеров зерна при перекристаллизации и наличие в материале некоторого количества высокотемпературной фазы приводит к упрочнению данной области, и в целом к наклепу. Отсюда следует, что изменение точки зрения на механизм пластической деформации дает возможность логичного объяснения сути процесса, и главное, возможность целенаправленного управления технологическими режимами обработки металлов. Кроме того, открываются возможности для существенной экономии энергии при прокатке металлов, что считается в [15] наиболее важным в металлургии будущего.

Кроме того, понимание механизмов пластической деформации имеет исключительно важное значение, так как дает возможность правильно оценить поведение металлических конструкций в экстремальных условиях эксплуатации и найти способы предотвращения катастрофического разрушения материала. Нами установлена неизвестная ранее закономерность волнового развития пластической деформации металлов путем ее локализации на разных структурных уровнях и их самосогласованным и самоорганизующимся поведением с развитием в локально-деформируемых зонах неравновесных деформационных превращений, сопровождающихся структурно-фазовыми перестройками вещества

**и изменением его физико-механических и химических свойств.**

Волновой характер распространения пластической деформации обусловлен синергетической природой распространения энергии в среде. Существующие неоднородности деформируемой среды усиливаются под действием градиентов напряжений, создавая градиент деформаций. Так, даже деформирование монокристаллов металлических и неметаллических систем приводит к появлению полос или систем полос скольжения, расположенных по длине деформируемого тела с определенной периодичностью. Ранее образование полос скольжения объясняли с позиции теории дислокаций, рассчитавшей уровень энергии необходимый на образование и движение дислокаций и их ансамблей. Однако, данная теория не объясняла за счет чего происходит периодичность в распределении локальных зон, и существования дальнодействующих управляемых сил в макромасштабе.

Если исходить из тезиса, что передача энергии в любой среде возможна только в виде волнового процесса, то именно этот механизм лежит в основе передачи механической энергии в деформируемом твердом теле, начиная от упругих деформаций и далее в пластичной области. Распространение волны в среде создает периодическое изменение параметров среды, возникновение градиентов напряжений, которые приводят к неоднородному и неравновесному состоянию деформируемого тела. Под воздействием управляемых параметров волнового поля начинается реакция деформируемой системы, проявляющаяся в ее самоорганизации, кооперативном поведении ее подсистем, стремящихся к устойчивому состоянию на новом энергетическом уровне. Амплитудно-частотный спектр волны предполагает, что не все области тела подвергаются неодинаковому воздействию. В гетерогенно однородных средах (монокристаллических объектов) деформация начинается в плоскостях облегченного скольжения, а в гетерогенных средах процессы пластического течения начинаются в наиболее ослабленных местах (скопления дефектов, границы зерен, фаз, концентраторы напряжений и т.д.). Волновой характер распределения и распространения полей напряжений хорошо описывается геометрически с помощью известных «конусов скольжения», проявляющихся при всех схемах напряженного состояния.

Локализация пластической деформации протекает на различных пространственно-масштабных уровнях (микро-, мезо- и макро) с различными временными параметрами развития (области спонтанной и устойчивой локализации).

На микроуровне – локализация пластического течения проявляется в пределах одного зерна (образование полос скольжения); на мезоуровне – в пределах группы зерен (образование пачек полос скольжения с определенным распределением по объему образца, образованием прослоек с измененной структурой) и на макроуровне – сосредоточение деформации в макрозоне с формированием визуально проявляемых зон (устойчивой геометрической шейки при растяжении, бочкообразности при сжатии, винтовой локализации при кручении и т.д.).

Временные параметры развития зон локализации деформации также различны и определяются временем жизни объекта. При этом происходит мгновенная локализация в зоне структурной напряженности материала (стыки зерен, концентрация дефектов, избыточная межфазовая или межзеренная поверхностная энергия, концентрационная неоднородность и т.п.). Процесс развития локализации деформации является дискретным (пульсирующим, волновым, циклическим). Причем цикл (акт) пластического течения может быть как однократным в локальном месте (сечении), так и многократным (проявляющийся в виде так называемой «бегающей шейки»). В результате кооперативного поведения этих факторов образуется зона устойчивой стационарной локализации (геометрическая шейка).

Кооперативное поведение зон спонтанной локализации является следствием взаимодействия многих внешних факторов (температура, схема напряженного состояния, кинетические параметры деформации, масштаб образцов, исходная морфология и структура, степень равновесности состояния материала), и волнового процесса деформации в самом деформируемом теле. Закономерности развития устойчивой локализации деформации определяются совокупностью взаимодействия исходной структуры материала и внешних параметров воздействия, определяя все виды ее проявления от хрупкого разрушения до сверхпластичного течения.

Результаты экспериментов авторов и обобщение литературных данных показали, что лока-

лизация деформации выражается в образовании металлографически определяемых зон со структурой, морфологически отличной от исходной. Области локализации циклически возникают на разных участках деформируемого материала или при определенных условиях объединяться в один общий очаг деформации. Процесс протекания пластической деформации носит волновой и вероятностный характер. При этом наблюдается сопоставимость размерных параметров структурных элементов и длины волны пластической деформации.

Авторами рассчитаны коэффициенты локализации деформации и установлена функциональная связь между степенью локализации и пластичностью материала. При распределении зон локализации деформации по всему объему образца наблюдается эффект взаимодействия этих зон в результате чего формируется устойчивый армирующий каркас – «эффект пучка», обеспечивающий прочность всего материала и целостность конструкции на его основе. Физическая природа этого эффекта заключается в частичной фиксации (неполной закалке) деформационно-структурного неравновесного состояния, т.е. имеет место аналогия введения легирующего элемента в основную фазу. Закономерности распределения пластической деформации определяются комплексом факторов, таких как исходная структура материала, масштабом деформируемого тела и температурно-кинетическими условиями нагружения. При условии сопоставимости размеров зоны локализации деформации с рабочим объемом образца наблюдается максимальная длительность процесса деформации до разрушения вплоть до проявления эффекта сверхпластичности. При ее сосредоточении в узких полосах сдвига – проявляется хрупкое разрушение.

Экспериментально-теоретические исследования авторов показали, что развитие пластической деформации твердых (металлических) тел при многофакторном внешнем воздействии приводят к следующим принципиальным выводам:

1) локализация деформации – основной структурно-энергетический организующий элемент волнового развития пластического течения твердых тел;

2) локализация деформации формируется на различных структурных уровнях деформируемых твердых тел – микро-, мезо- и макро-;

3) деформационные процессы - самоорганизующееся кооперативное поведение материала в локально деформированных зонах, как реакция его на внешнее многофакторное воздействие.

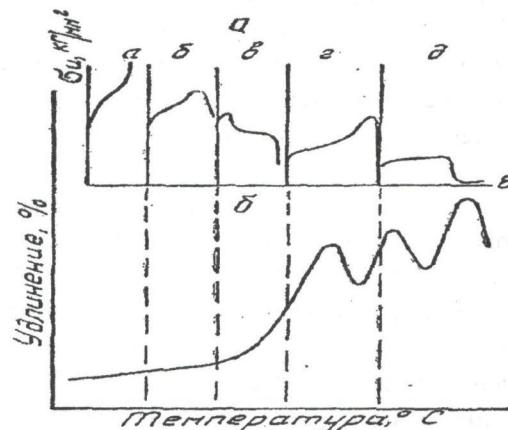
Элементарный акт появления и развития локальной зоны деформации заключается в мгновенном (кратковременном) преобразовании вещества в месте достаточного накопления энергии, в падении напряжения в данной зоне с одновременным пластическим, диффузионным течением материала под действием внешних условий. Все перечисленные процессы сопровождаются упрочнением материала в зоне локализации. Явление упрочнения может быть использовано в создании технологии физико-механического упрочнения металлов и сплавов.

Результаты исследований, проведенных авторами, позволяют прийти к представлению о глубокой связи процессов развития пластической деформации в масштабе образца и развитию этих процессов на различных структурных уровнях самого материала. Характер проявления локализации деформации определяется суперпозицией и кинетическим соответствием двух основных процессов – закономерностями внешнего воздействия и процессами трансформации вещества в деформируемом материале.

Авторами показано, что процесс пластической деформации по совокупности экспериментальных данных и их теоретического анализа может быть интерпретирован как деформационное превращение и отнесен к фазово-структурным неравновесным синергетическим системам, включающим в себя пространственно-временные структуры с различной степенью порядка, постоянно изменяющийся в колебательном режиме. Описать эти состояния с позиции равновесной термодинамики невозможно, т.к. они не существуют в состоянии равновесия, а только «в процессе и под действием деформации». Деформационные превращения – это процесс непрерывного изменения и самоорганизации структуры на различных структурных уровнях, связанных друг с другом принципом подчинения волновой природы пластической деформации. Деформационные превращения являются своеобразными резонансными состояниями вещества между двумя возможными стационарными состояниями. Поскольку пластическая деформация имеет волновой характер развития, а внешние воздей-

ствия в большинстве случаев также имеют волновую природу, поэтому взаимодействие двух волновых процессов может привести к резонансным явлениям и соответственному изменению свойств материала. Понимание закономерностей этих процессов позволяет прогнозировать условия преждевременного разрушения материалов и конструкций в условиях многофакторного воздействия. Исследуя фундаментальные основы структурообразования и механизма пластической деформации для прогнозирования свойств материалов в экстремальных условиях эксплуатации, авторы сформулировали следующее открытие: «Теоретически и экспериментально установлена ранее неизвестная закономерность кооперативного самосогласованного и самоорганизующегося поведения деформируемого материала, заключающееся в том, что при наличии в нем исходной структурной неоднородности (кристаллическая решетка материала, межзеренные, межфазовые и колониальные границы, скопления поверхностных и объемных дефектов, включения примесных атомов, поверхности и объема образца) при воздействии внешних сил пластическая деформация проявляется в виде участков локализации с направленными диффузионными потоками вещества, в которых дискретно развиваются неравновесные деформационные превращения, приводящие к кардинальному изменению структуры материала и его физико-механических свойств».

Например, на основании изучения кривых течения (рис.) было показано, что механические



Общий вид кривой изменения удлинения алюминиевых образцов с температурой и типы кривых течения, описывающих процесс деформации образцов в определенных интервалах температур (α–δ)

свойства чистых металлов и сплавов при пластической деформации не остаются постоянными. На определенных стадиях формоизменения упрочнение сменяется разупрочнением, особенно на стадии развития устойчивой локализации деформации. Безусловно, поведение материала в процессе деформации, сопротивление деформированию и особенности локального течения зависят от фазового состава сплавов, температуры и исходного состояния образцов.

Научное значение открытия заключается в том, что на базе этого открытия, авторами предлагается новая концепция пластической деформации, не только объединяющая все прежде существующие статистические теории и гипотезы пластического течения, базирующиеся на идеи исходной дефектности материала и ее изменения в процессе деформации, но и предлагающая новый подход – динамический неравновесный кооперативный характер развития локально-деформируемых зон, в которых развиваются деформационные превращения, сопровождающиеся кардинальной структурно-фазовой перестройкой материала, приводящей к изменению и физико-механических свойств и их дискретному распределению по объему в результате неоднородного развития пластического течения.

В механике деформируемого твердого тела открытие позволяет решить задачи по определению сложно-напряженного состояния деформируемого твердого тела с учетом сложных неравновесных процессов структурно-фазовых превращений.

В физике прочности и пластичности открытие позволяет ввести новый класс неравновесных деформационных превращений, существующих только в процессе пластического течения, как своеобразные резонансные состояния вещества.

Благодаря открытию решена многолетняя научная дискуссия не только о разбросе физико-механических свойств пластичных материалов в условиях многофакторного воздействия, но показана приоритетность влияния различных факторов на разных стадиях пластического течения для широкого ряда материалов: от хрупких до сверхпластичных, для которых наблюдается влияние как исходной дефектной структуры образцов, так и сложных фазовых процессов, развивающихся в условиях волнового развития пластической деформации. Открытие позволило разра-

ботать представление многофакторной зависимости физико-механических свойств и прогнозирование их изменения в реальных условиях эксплуатации, что дает возможность оценить эксплуатационные характеристики механических свойств систем и надежность конструкций.

В области обработки металлов давлением открытие показало способы стабилизации и упрочнения структуры за счет развития локально-деформируемых зон и их распределения по деформируемому телу. Снижение усилий прокатки возможно за счет изменения масштаба и кинетических условий соответствия деформирования и развивающихся деформационных превращений.

Практическое значение открытия выражается в том, что оно может быть использовано в различных отраслях науки, техники и промышленности, для прогнозирования поведения пластичных металлов и сплавов в многофакторных условиях их эксплуатации, а также при организации технологических процессов при обработке металлов давлением.

Уже в настоящее время можно использовать материалы этого открытия для практических целей (например, как прогнозировалось в [15]). Можно существенно сократить расход энергии на изготовление конструкционных материалов на прокатных станах различного назначения и конструкций. Есть возможность добиться эффекта существенного упрочнения металлов и сплавов, не прибегая к кардинальным изменениям технологии пластической деформации.

Можно предположить, что полученные авторами фундаментальные сведения внесут весомый вклад в практику заводов по обработке металлов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. М.: Мир, 1972.
- Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272 с.
- Барышев С.Е., Пилуй В.А., Жуков В.Д. и др. Регистрация импульсов акустической эмиссии, возникающих при пластической деформации металлов // Технология легких сплавов. 1973. №7. С. 73-76.
- Федотов А.С., Метол-Реглин Л.Ю. Влияние пластической деформации на теплопроводность образцов из чистой меди и серебра // Физика твердого тела. 1982. Т. 24, вып. 1. С. 207-210.
- Миндюк А.К. О зависимости электросопротивления и характера проводимости металлов от их электронного

строения и деформации // Физико-химическая механика материалов. 1972. №2. С. 38-43.

6. Крок Д. Электронная эмиссия при деформации металлов с ГЦК решеткой / Сб. Материалы 5-го всесоюзного семинара по механоэмиссии и механохимии твердых тел. 1975. Т. 2. Таллин, 2004.

7. Иванченко Л.Л., Лазаренко Л.И., Львов Г.К. Изменение физических свойств меди при пластической деформации // Изв. АН СССР. Металлы. 1974. Т. 4. С. 155-156.

8. Актурин М.Ш., и др. Твердотельные реакции при действии сосредоточенной нагрузки. / XI Совещание по кинетике и механизму химических реакций в твердом теле. Июнь 1992. Минск: Тез. докладов. Минск, 1992. С. 180-181.

9. Нечаев Ю.С., Владимиров С.А. Пустов Ю.А. О возможности локальных фазовых переходов «Кристаллическое состояние-аморфное состояние» в никеле при пластической деформации // Изв. АН СССР. Металлы. 1980. №4. С. 174-179.

10. Дударев Е.Ф., Бакач Г.П., Грабовецкая Г.П., Колобов Ю.Р., Кашин О.А., Чернова Л.В. Деформационное поведение и локализация пластической деформации на мезо- и макромасштабном уровнях в субмикрокристаллическом титане // Физическая мезомеханика. 2001. Т. 4, № 1. С. 97-104.

11. Панин В.Е., Зуев Л.Б., Данилов В.И. и др. Пластическая деформация как волновой процесс // ДАН СССР. 1989. Т. 308, № 6. С. 1375-1379.

12. Ли Л., Лаффорт Ф. О влиянии параметра материалов на неоднородное пластическое течение при простом ра-

стяжении // Физика твердого тела. 1980. № 10. С. 1415-1426.

13. Лаврентьев Ф.В., Никифоренко В.Н. Изменение деформирующего напряжения и электросопротивления монокристаллов цинка при скольжении // Изв. вузов. Физика. 1983. №7. С. 18-21

14. Мусеев Л.М. Изменение электропроводности монокристаллов кремнистого железа при циклической деформации // Изв. АН СССР. Металлы. 1974. №3. С. 189-193.

15. Outlines of development of metallurgical processes on the next century |Heikki Jalkanen || Material Tech. 91: 2<sup>nd</sup> Europ. East-West Symp. Matre. And Processes |Helsinki, May 26-30, 1991|, p. 391.

## Резюме

Металдардың (материалдардың) пластикалық ағыны құбылышының өту тұрасындағы ашылған жаңалығының қатаң оқшаулану аймағындағы негізгі деректері, онда затаралық тепе-тенсіздік жағдайында болады және осы құбылышпен байланыстағы пластикалық ағынның сипаттамасы көлтірілген.

## Summary

Fundamental research data on discovered phenomenon of metals (materials) plastic flows in strictly localized regions where the substance is in a nonequilibrium transition state are considered and performances of plastic flows due to this phenomenon are specified.

Поступила 16.09.08г.