

**А.А. Бычков**

---

# **УСТОЙЧИВОСТЬ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ**

**Монография**

**RU**  
**science**  
ПОРТАЛ РОССИЙСКОЙ НАУКИ  
RU-SCIENCE.COM

**Москва**  
**2024**

**УДК 539.3:539.52**

**ББК 22.251**

**Б95**

**Рецензенты:**

**Д.Н. Карпинский**, проф. Южного федерального университета,  
д-р физ.-мат. наук;

**М.И. Чебаков**, проф. Южного федерального университета,  
д-р физ.-мат. наук

**Автор**

**А.А. Бычков**, Южный федеральный университет, канд. физ.-мат.  
наук, доц.

**Бычков, Андрей Александрович.**

**Б95**

Устойчивость вязкопластического деформирования при растяжении : монография / А.А. Бычков. — Москва : РУСАЙНС, 2024. — 92 с.

**ISBN 978-5-466-07332-4**

В книге рассматриваются вопросы устойчивости однородного деформирования при растяжении стержня из термовязкопластичного материала и воздействию на него электрического тока и растворенного водорода. Сформулированы системы уравнений, описывающих пластическое деформирование пористого стержня с учетом действия электрического тока и водородной хрупкости. Исследована устойчивость однородного решения полученных систем дифференциальных уравнений в частных производных и выполнен численный расчет эволюции механических и тепловых полей в исследуемом стержне. Методика исследования включает в себя использование математической теории пластичности, теории устойчивости Раусса – Гурвица, иннорной теории, метода конечных разностей. Особое внимание уделено подробному обсуждению полученных результатов и соответствующим выводам. Представленные результаты помогают определить оптимальные режимы управления деформированием с помощью электрического тока в реальных условиях наводороженного образца.

Монография подготовлена в Южном федеральном университете.

*Для студентов, аспирантов и научных работников, специализирующихся в области механики деформируемого твердого тела.*

**УДК 539.3:539.52**

**ББК 22.251**

**ISBN 978-5-466-07332-4**

© Бычков А.А., 2024

© ООО «РУСАЙНС», 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	4
Глава 1 Пластическая деформация твердых тел .....	6
1.1 Большие пластические деформации и их локализация .....	6
1.2. Электропластическая деформация металлов .....	16
1.3. Пластическое деформирование наводороженных металлов.....	19
Глава 2 Исследование устойчивости пластического деформирования растягиваемого стержня .....	25
2.1. Расчет условий образования шейки в сплошном стержне .....	25
2.2. Расчет условий образования шейки в пористом стержне .....	38
Глава 3 Исследование влияния электрического тока на образование шейки в растягиваемом стержне.....	46
3.1. Влияние постоянного электрического тока на условия образования шейки .....	46
3.2. Влияние переменного электрического тока на условия образования шейки .....	60
Глава 4 Исследование условий образования шейки в наводороженном стержне.....	73
4.1. Постановка задачи .....	73
4.4. Обсуждение результатов .....	82
Заключение .....	85
Литература.....	86

## ВВЕДЕНИЕ

Локализация пластической деформации обнаружена давно. Однако считалось, что это явление характерно только для больших степеней формоизменения твердых тел. В настоящее время установлено, что любая неупругая деформация протекает неоднородно, при этом в процессе поочередно вовлекаются различные области деформируемого материала, в то время как в остальных частях пластическое течение выражено слабо. Эффекты пластической нестабильности имеют место как при простых (растяжение, сжатие, кручение), так и при сложных (ковка, штамповка, прокатка и др.) режимах нагружения. Анализ экспериментальных результатов приводит к выводу, что способность поликристаллических материалов к пластическому течению есть способность к локализации деформации. Теоретические исследования эволюции пластической деформации выполнены в работах Бриджмена П., Грабского М.В., Ключникова В.Д., Лихачева В.А., Никулина С.А., Преснякова А.А., Рузанова Ф.И., Рыбина В.В., Hart E.W., Hutchinson J.W., Molinari A., однако многие вопросы остались за рамками данных исследований. В частности, представляется необходимым проведение тщательного изучения условий образования шейки в материале со сложными реологическими свойствами, в условиях действия электрического тока и водородной хрупкости. В целом, актуальной является проблема создания физически обоснованной феноменологической теории, описывающей процесс деформирования твердых тел с учетом локализации пластической деформации.

Книга состоит из введения, четырех глав и заключения.

Первая глава состоит из четырех параграфов и содержит обзор литературы, посвященной исследованию пластической деформации твердых тел, который дает представление о современном состоянии проблемы, степени новизны работы и подготовки ее имеющимися публикациями. Первый параграф содержит обзор литературы, посвященной исследованию больших пластических деформаций, локализации пластической деформации, влиянию деформационных пор на пластическую деформацию металлов и сплавов. Второй параграф содержит обзор литературы посвященной исследованию электропластической деформации. Третий параграф содержит обзор литературы посвященной исследованию влияния водорода на пластическую деформацию. В четвертом параграфе сделаны основные выводы по обзору литературы поставлена задача, решаемая в дальнейшем.

Во второй главе, состоящей из трех параграфов, излагаются основные соотношения и результаты расчетов для сплошного и пористого растягиваемого стержня. В первом параграфе решается задача для сплошного стержня. Во втором параграфе решается задача для стержня содержащего деформационные поры. Третий параграф содержит выводы по полученным результатам.

В третьей главе, состоящей из трех параграфов, приведены результаты расчетов растяжения стержня в условиях воздействия на него постоянного и переменного электрического тока. В первом параграфе решается задача для стержня содержащего деформационные поры при воздействии на него постоянного электрического тока. Ток действует на стержень в двух режимах: в режиме постоянной силы тока в стержне и в режиме постоянной разности потенциала на концах стержня. Во втором параграфе решается задача для сплошного стержня при воздействии на него переменного электрического тока в режиме постоянной разности потенциала на концах стержня. Третий параграф содержит выводы по полученным результатам.

Четвертая глава содержит результаты расчетов для модели стержня, учитывающей присутствие в материале образца атомов водорода.

Каждый из первых двух параграфов второй и третьей глав, а также четвертая глава, состоят из четырех пунктов: постановки задачи, линейного анализа, нелинейного анализа, обсуждения результатов. В конце каждого параграфа представлены рисунки с полученными результатами.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

# ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

## 1.1 Большие пластические деформации и их локализация

Поведение материалов при больших пластических деформациях одним из первых описал П.Бриджмен [4]. Его работа связана с изучением влияния гидростатического давления на большие пластические деформации и разрыв. В [4] рассмотрено идеальное пластическое тело, подчиняющееся условию Мизеса, наложены также некоторые ограничения на скорость пластической деформации.

В случае деформационного упрочнения уравнения для скорости деформации, выражающие изотропность и постоянство объема, оставляют обычно неизменными [4], а в функцию пластичности вводят помимо напряжений также и деформации. Если приложенная сила немного больше, чем требуется для перевода тела в пластическое состояние, то пластическая деформация уже не может быть неограниченно большой, а скорость ее также не может быть задана произвольно и определяется величиной избыточной силы. Пластическую деформацию можно неограниченно увеличивать без наступления разрыва, если воспользоваться действием гидростатического давления или, в отдельных случаях, других видов напряжения (простое сжатие или кручение). Напряжения, при которых возможны большие пластические деформации, действуют, обычно, таким образом, что способствуют закрытию начинающихся разрывов.

Пластическая деформация сопровождается различными временными эффектами. При малых деформациях, когда состояние металла еще близко к исходному, скорость пластической деформации возрастает экспоненциально по мере удаления от кривой деформационного упрочнения. При больших деформациях скорость уже не изменяется плавно, и имеют место неожиданные скачки скорости. По мере увеличения деформации возрастает необходимость учета всех параметров для определения пластических свойств тела, а именно, напряжения, деформации и, кроме того, всей предшествующей истории образца. Для объяснения скачков скорости и других аналогичных дефектов, подчеркивается в [4], недостаточно даже знания напряжений и деформаций в течении всей истории образца, а необходимо вообще отказаться от рассмотрения таких макроскопических параметров, как напряжение и деформация, и перейти в микроскопическую область.

Вполне удовлетворительная теория, согласно [4], должна учитывать и анизотропию деформационного упрочнения. Опытные данные показывают, что упрочнение не является изотропным, при этом наблюдаются очень сложные явления. При малом деформационном упрочнении может иметь место эффект Баушингера, т.е. деформационное упрочнение для положительной деформации и разупрочнение для отрицательной деформации.

Исходя из экспериментальных данных Бриджмен сделал вывод, что не существует резкого разграничения между явлением пластической деформации и разрыва. В частности, можно привести такие примеры, в которых трудно различить, происходит ли в теле пластическая деформация или разрыв с непрерывным самозалечиванием. Пластическая деформация в теле с дискретной атомной структурой представляет собой, в принципе, не что иное, как равномерно распределенный и квазинепрерывный разрыв с постоянным самозалечиванием. Во многих случаях разрыв начинается, распространяется на некоторое расстояние и затем останавливается. Расстояние, на которое распространяется разрыв до остановки в результате самозалечивания, зависит как от граничных условий, так и от условий, существующих внутри тела.

В [4] для исследования проблемы неоднородности напряжений в шейке образца предлагается использовать три степени приближения. Первая, вообще не учитывающая наличия шейки, характеризуется технической прочностью на разрыв, которая определяется делением разрушающей нагрузки на начальное недеформированное поперечное сечение образца. Вторая - рассматривает истинное напряжение в шейке, которое находится делением общей растягивающей нагрузки на мгновенное значение площади поперечного сечения шейки образца; ее использование оправдано, обычно, при уменьшении поперечного сечения при разрыве порядка 50%. Третья степень приближения имеет задачей определение распределения напряжений и деформаций в плоскости шейки с точностью, достаточной для того, чтобы можно было различить значения на оси от средних значений в плоскости шейки и, таким образом, яснее осветить условия разрыва. Для этого приближения рассматриваются только условия в шейке и, кроме того, контур по соседству с шейкой можно характеризовать одним параметром - радиусом кривизны круга, касающегося профиля в месте шейки. Как показывают экспериментальные данные деформация в плоскости сечения шейки распределяется однородно.

Дальнейшее развитие изучение проблемы больших пластических деформаций и связанной с ними локализации деформации получило в

работах [1, 2, 11, 31, 36, 52]. Г.И.Баренблатт в [1,2] излагает теоретическую схему холодной вытяжки наблюдаемой при растяжении полимерных материалов. Если испытание ведется при постоянной скорости деформации образца, то вначале растяжение происходит однородно по всему образцу, причем действующее в образце напряжение растет пропорционально деформации. В некоторый момент в образце появляется резкое сужение - шейка, которая однако не сужается вплоть до разрыва, а сужается только до определенного предела, после чего начинает распространяться вдоль образца, пока не охватывает его целиком. Распространение границы шейки идет с постоянной скоростью и притом так, что эта граница перемещается по образцу как твердое тело, сохраняя свою форму неизменной, а растягивающее напряжение при этом остается постоянным. Когда шейка полностью охватывает весь образец, деформация некоторое время снова протекает однородно по всему образцу, причем растягивающее напряжение возрастает с увеличением деформации примерно по линейному закону. Затем в некотором месте образца снова возникает резкое сужение - "шейка второго порядка", и явление повторяется.

В этой связи в [1] сделаны следующие предположения. Во-первых, предполагается, что отклонения напряжения и концентрации превращенного (т.е. более высоко ориентированного, по сравнению с исходным состоянием) вещества от средних по сечению величин являются случайными величинами, распределенными статистически однородно по сечению. Во-вторых корреляция напряжений и концентраций превращенного вещества в соседних сечениях однородна по длине образца. Автор [1] также пришел к заключению, что превращение - ориентационное деформирование элементов надмолекулярной структуры происходит в тех случаях, когда имеют место явления распространения шейки со скоростью, резко зависящей от напряжения и слабо - от концентрации.

Явлению сверхпластичности были посвящены работы [11, 36]. В [11] сверхпластичность определяется как способность материалов к большим пластическим деформациям без нарушения внутренней сплошности, проявляющаяся при высоких гомологических температурах под влиянием напряжений, величина которых очень низка и сильно зависит от скорости деформации. При этом различают два вида сверхпластичности: 1) сверхпластичность под влиянием особых внешних условий; 2) структурную сверхпластичность.

В [11] сформулирован критерий устойчивости деформации образца при растяжении. Для обычных материалов, это условие



$$\frac{n}{\varepsilon} \geq 1, \quad (1.1.1)$$

где  $n$  - показатель упрочнения,  $\varepsilon$  - деформация, а для вязкопластичных материалов -

$$\frac{n}{\varepsilon} + m \geq 1, \quad (1.1.2)$$

где  $m$  - параметр материала описывающий чувствительность напряжения пластического течения к скорости деформации (т.е. склонность материала к упрочнению при увеличении скорости деформации).

В случае вязкопластичного материала, для напряжения  $\sigma$  приводится следующее соотношение

$$\sigma = C(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \dot{\varepsilon}^m. \quad (1.1.3)$$

При этом наблюдаемая стабильность растягиваемого образца, с физической точки зрения, является следствием локального упрочнения благодаря появлению эффекта чувствительности напряжения течения к скорости деформации. Появление каждой неоднородности течения приводит к локальному увеличению  $\dot{\varepsilon}$  и, соответственно, к росту напряжения течения в этой области (локальному мгновенному упрочнению), а тем самым к уменьшению локализации деформации.

В процессе экспериментов было обнаружено, что развитие аномалий пластичности происходит после образования шейки [31]. Провал пластичности, максимумы удлинения и эффект сверхпластичности обнаруживаются в большинстве случаев после того, как в той или иной мере развито явление локализации деформации. Таким образом, развитие аномалий пластичности, делает вывод автор, есть следствие процессов, развивающихся в очаге локализации деформации и, естественно, связанных с развитием локального течения металла при деформировании.

Большие пластические деформации отличает прежде всего существенная неравномерность течения, которая проявляется как развитие местных, локальных деформаций имеющих очень большую величину. К критериям локальных деформаций относят: максимальное равномерное сужение и удлинение, полное сужение и удлинение, объем локально деформированной части металла, скорость равномерного течения, среднюю и истинную скорость течения в месте локализации деформации. Из механических характеристик при исследовании больших деформаций как наиболее важные указываются напряжения течения: порог локализации  $\sigma_I$  - напряжение, соответствующее переходу к сосредоточенному формоизменению, и порог разрушения  $\sigma_{II}$ .

Одним из самых важных вопросов исследования локализации, подчеркивается в [31], является определение изменения физико-механических свойств материала во время очень больших деформаций. Наиболее интересные свойства, характеризующие состояние металла во время деформации и после ее снятия, - это сопротивление деформированию (истинные напряжения течения), коэффициенты упрочнения всех видов, изменение электросопротивления и его температурного коэффициента, величина теплового эффекта деформации в различные ее периоды.

Анализ характеристик локализации деформации показывает, что пластичность металлов определяется развитием локализации деформации, и чем выше последняя, тем более пластичным оказывается материал. Появление неустойчивой локализации деформации (“бегающей шейки”) происходит непосредственно по достижении предела текучести и проявляется как возникновение и приостановка областей локального течения на образце со скачкообразным изменением напряжений течения и истинной скорости деформации. Таким образом, пластическая деформация представляет собой непрерывное возникновение и приостановку локализации до момента появления устойчивой шейки с последующим ее развитием.

Физические причины появления неустойчивой локализации деформации неясны. При исследовании причин локализации деформации с механической точки зрения, т.е. при определении соотношения действующих напряжений, темпов упрочнения и т.д., не установлено, в силу чего в деформируемом материале наступает колебательное упрочнение-разупрочнение и устойчивое разупрочнение.

При развитии шейки в ней возникает схема всестороннего растяжения, которая связана с падением максимальных напряжений сдвига по мере роста поперечных, т.е. возникает так называемое “геометрическое упрочнение”. Именно поперечные напряжения и приводят к увеличению максимальных напряжений течения в условиях разупрочнения материалов при развитии шейки.

При переходе от неустойчивой стадии локализации деформации к устойчивой происходит изменение в ходе деформации. Его природа не исследована с физической точки зрения. В [31] высказано предположение, что устойчивая локализация формоизменения наступает в связи со все большим числом спонтанно возникающих шеек при достаточно больших деформациях, которые, воздействуя одна на другую физически и механически делают этот процесс устойчивым. При очень высокой пластичности материалов иногда возникает несколько шеек,

развивающихся независимо друг от друга под действием целого спектра деформирующих напряжений.

Разрушение обычно начинается в центральных волокнах металла и распространяется затем на периферию образца. Многие исследователи считают [31], что первая трещина появляется в условиях наиболее резко выраженного действия схемы напряженного состояния всестороннего растяжения от действия нормальных растягивающих напряжений. Исследование образцов материалов при различных температурах показывает, что показатель предельной равномерной деформации, т.е. величина, определяющая момент появления устойчивой локализации деформации, уменьшается с температурой.

В работах [55, 57, 58, 61, 62, 64, 66, 73] были построены различные математические модели больших пластических деформаций. В [61, 64] рассматривается одноосное растяжение стержня при малых скоростях деформирования, при этом не учитывается влияние температуры.

В [66] рассматривается двухмерная модель растягиваемого цилиндрического образца. После появления шейки, при максимальной нагрузке, напряжения и деформации распределяются неоднородно по сечению, увеличиваясь плавно от поверхности к оси симметрии образца. Модель, однако, не учитывает ни температурной зависимости, ни влияния скорости деформации.

При высоких скоростях неупругой деформации обычно наблюдается явление, заключающееся в формировании узких полос интенсивной сдвиговой деформации. F.H.Wu и L.B.Freund [73] учитывали при этом нескольких взаимосвязанных факторов. Механическая работа, приведшая к неупругой деформации материала, рассеивается локально в виде тепла, и при достаточно высокой скорости деформации тепловой процесс будет адиабатическим. В неоднородном деформационном процессе локализация тепла ведет к уменьшению сопротивления материала и дальнейшей деформации, которая, в свою очередь, ведет к генерированию большего тепла и т.д. Материал становится нестабильным в смысле механического равновесия, и высоко локализованная интенсивная деформация развивается обычно в форме сдвиговой полосы, расположенной в направлении максимума сдвигового напряжения.

В предлагаемой авторами [73] модели материал проявляет деформационное упрочнение, термическое разупрочнение и деформационную скоростную чувствительность. Анализируется одномерное сдвиговое волновое распространение в полупространстве нелинейного материала, подверженного зависящему от времени, но пространствен-

но однородному, тангенциальному нагружению. В частности, предлагается следующее соотношение для напряжения и деформации:

$$\frac{\tau}{\tau_0} = f\left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right) + m\dot{\gamma}; \dot{\gamma} \geq 0, \quad (1.1.4)$$

где  $f(z) = z^n / (1 + az^{n+1})$ ;  $\tau_0, \gamma_0, n$  - константы,  $\gamma$  - сдвиговая деформация,  $\tau$  - напряжение;  $m$  является параметром линейной чувствительности, а параметр  $a$  представляет относительное влияние деформационного упрочнения (которое оказывает влияние при очень малых  $a$ ) и термического разупрочнения (доминирующего, если  $a$  очень велико). Результатом этих конкурирующих эффектов является тонкий слой быстро деформируемого материала, расположенный вблизи границы.

В случае значительного сопротивления структуры материала при очень высокой скорости пластической деформации механизм протекания процесса является термически активированным движением дислокаций. В этих условиях зависимость напряжения от скорости деформации является логарифмической и имеет следующий вид:

$$\frac{\tau}{\tau_0} = f\left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right) \left[ 1 + p \ln\left(1 + \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0}\right) \right], \quad (1.1.5)$$

где  $p$  - безразмерная постоянная.

C. Fressengeas и A. Molinari в [57, 58] также анализируют одномерную модель одноосного растяжения с учетом температурных и динамических эффектов, имеющих место при локализации пластической деформации. При этом принимается во внимание геометрическое и температурное разупрочнение, деформационное упрочнение, инерционные эффекты и теплопроводность. Для напряжения  $\sigma$  рассматривается следующее эмпирическое соотношение:

$$\sigma = \mu \theta^v \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m, \quad (1.1.6)$$

где  $\theta$  - температура,  $\varepsilon$  - деформация,  $\mu, v, n, m$  - постоянные. Однако, в [57, 58] рассмотрены только некоторые частные случаи параметров нагружения и свойств материала.

В ранних теоретических исследованиях модели не учитывали развитие несплошностей при деформировании, однако во многих из них (см., например, [1, 2, 61, 62, 64]) говорится об удовлетворительном совпадении экспериментальных и расчетных данных. С другой стороны представляется актуальным вопрос о влиянии несплошностей в материале стержня на условия шейкообразования, поставленный в [28].

Исследования взаимосвязи локализации деформации и накопления несплошностей дали противоречивые результаты. Так, в [33] показано, что критическая фрагментированная структура и зародышевые микротрещины возникают в образце не где угодно, а только в шейке, причем намного позже момента ее образования. Образец деформируется в условиях сплошности в течение 90-95% времени жизни, и лишь в самый последний момент в нем лавинообразно высыпают микротрещины, рост и объединение которых вызывают практически мгновенное его разрушение.

С другой стороны, в [53] указывается, что множественное образование зародышевых несплошностей начинается, как правило, на ранней стадии пластической деформации и растет пропорционально деформации. Причем интенсивное образование, развитие и слияние несплошностей происходит в основном в тонких приповерхностных слоях, в которых скорость накопления и концентрация несплошностей на 1-3 порядка выше, чем в объеме материала.

На основе результатов [53] в [28] сделан вывод о невозможности адекватного описания локализации пластического течения только в таких переменных, как напряжение, деформация, скорость деформации. Согласно [28], необходимо еще знать количество, распределение и скорость перемещения дефектов. В [14, 23] представлена модель вязкого разрушения, учитывающая одновременно зарождение и рост пор, которая позволяет вычислить долговечность однородно напряженного элементарного объема твердого тела. Однако в стороне остаются термомеханические и геометрические свойства образца и условия испытания. Противоречивость экспериментальных данных в [33, 53] не позволяет в настоящее время построить стройную теорию шейкообразования в стержнях при растяжении.

Особенности проявления эффекта сверхпластичности [13] (способности материалов к большим, порядка  $10^2$ - $10^3$  %, деформациям при относительно низком уровне напряжений) - изменение размера зерен, образование и развитие пористости - свидетельствует о необходимости явного учета структуры материала, а сильное влияние скорости деформирования на режимы деформирования - корректного описания релаксационных процессов.

Согласно [13] традиционные теории пластичности механики деформируемого твердого тела не позволяют объяснить сверхпластичность, так как областью их исследования является поведение материалов при слабой реакции на скорость деформирования в интервале умеренных и низких значений последней. Кроме того, эти подходы опи-

раются в основном на принципы Друкера и наибольшей возможной работы, т.е. выделяют среди состояний равновесия устойчивое равновесие как наиболее вероятное. Напротив, аномально большие пластические деформации часто реализуются в области неустойчивой реакции твердого тела на нагружения (например, при локализации деформирования).

В настоящее время накоплен большой материал по теоретическому и экспериментальному исследованию вязкого разрушения. Построены различные модели роста пор и их слияния [14, 23]. Большинство моделей основаны на формулировке критического состояния, отвечающего потере деформационной способности материала. Указанное критическое состояние соответствует условию, когда перемиčky между порами не в состоянии уравновесивать внешнюю нагрузку, что приводит к слиянию пор и к местным разрывам.

В [14] представлена модель вязкого разрушения материала, рассматривающая процесс одновременного образования и роста пор и базирующаяся на введенном понятии пластической неустойчивости в структурном элементе материала, как состоянии, контролирующем критическую деформацию  $\epsilon_f$  при вязком разрушении. Модель позволяет определить  $\epsilon_f$  и, в то же время, отойти от описания процесса непосредственного слияния пор, а также позволяет прогнозировать влияние переменной жесткости напряженного состояния, объемной доли включений, их концентрации и типа на величину критической деформации при вязком разрушении.

При механизме зарождения пор, обусловленном фрагментацией структуры и характерном для чистых материалов, жесткость напряженного состояния влияет на  $\epsilon_f$  в меньшей степени (особенно при малых значениях жесткости), чем при зарождении пор на включениях, характерном для конструкционных материалов.

В [23], на основе анализа зарождения и роста пор, обусловленного пластическим деформированием и диффузией вакансий, разработана модель разрушения при ползучести в условиях объемного напряженного состояния.

Для объяснения поведения и свойств материалов в состоянии сверхпластичности необходимо сочетание реологического подхода к описанию собственно механики сверхпластического поведения со структурным подходом [25]. В [25] показано, что условием существования сверхпластического течения является постоянный уровень объемной концентрации пор, поддерживаемый в ходе динамического про-

цесса их зарождения при проскальзывании зерен относительно друг друга и схлопывании. Порообразование способствует ускорению зернограницного проскальзывания - одного из основных механизмов, обеспечивающих высокую пластичность. Поэтому несмотря на малый непосредственный вклад пор в полную деформацию до разрушения, пористость существенно облегчает сверхпластическое течение, особенно у крупнозернистых материалов.

Данные о кинематике накопления микроповреждений в шейке растягиваемого образца, показывают [28], что после начала локализации пластической деформации в центральной части осевого сечения развиваются микротрещины и поры. Плотность последних с увеличением степени деформации возрастает. По мере дальнейшего деформирования происходит слияние микротрещин и пор в центральную вязкую отрывную макротрещину, распространение которой приводит к разделению образца на части (макроразрушению). Таким образом, [28], возникновение, рост и коалесценция (слияние) пор, микротрещин являются основными эффектами при шейкообразовании, и необходимо включать их в описание процессов локализации. В [21] отмечается, что если пористость формируется в процессе нагружения, она способствует увеличению предельной пластичности материала; если же поры изначально присутствуют в материале, то пористость приводит к разрушению при низких значениях деформации разрушения.

В аналитической работе С.А.Никулина [29], обобщающей современные представления о развитии пластической неустойчивости в металлах, обсуждается проблема управления процессом пластического деформирования стержня с целью получения максимальной равномерной деформации при растяжении. На основе анализа экспериментальных данных о деформировании образцов с различной структурой в [29] сделано заключение о двух способах потери устойчивости пластического течения: а) геометрическое разупрочнение - потеря устойчивости при  $\varepsilon_p = n$  ( $\varepsilon_p$  - предел равномерной деформации,  $n$  - показатель степени деформационного упрочнения) - зарождение трещины на оси шейки - длинная шейка (максимум удлинения образца) - плоский чашечный разлом; б) зарождение трещины (внутренняя шейка) при  $\varepsilon_{hp} < \varepsilon_p$  ( $\varepsilon_{hp}$  - деформация, достаточная для зарождения трещины) - потеря устойчивости при  $\varepsilon_p < n$  - рост и слияние пор - короткая шейка, глубокая чашка (максимум удлинения периферийной части чашки). По-видимому, вариант а) рассматривался в работах [1, 2, 57, 61, 64], а вариант б) соответствует представлениям [28].

## 1.2. Электропластическая деформация металлов

Рассмотрим теперь известные результаты исследований влияния электрического тока на механические свойства нагруженного твердого тела. В [51] предложено условно разделить это влияние на две группы: 1) существующие при постоянных или слабо переменных полях; 2) проявляющиеся только в результате генерирования импульсных полей. Для первой группы характерны изменение энергетического спектра бездефектного материала под действием магнитного поля, влияние тока на подвижность дислокаций и тепловое воздействие тока. Для второй группы представляет значительный интерес поведение металлов в импульсных электромагнитных полях [32, 38, 51]. По мнению авторов [38, 51] использование импульсных электромагнитных полей, тепловое действие которых совместно с электропластическим эффектом способствует облегчению пластической деформации в местах концентрации напряжений, является перспективным технологическим методом. В частности, одним из методов управления условиями деформирования образца является его электропластическая обработка с целью понижения энергозатрат и предупреждения появления шейки, например, при волочении проволоки [12, 38].

Тепло, выделяющееся при этом в образце, воздействие на него пондеромоторных сил (пинч-эффект), влияние тока на подвижность дислокаций (электропластичность) существенно изменяют условия его деформирования и, по мнению авторов [32, 38, 51], способствуют облегчению пластической деформации в местах концентрации напряжений.

Взаимодействие деформируемого металла с электрическим током и ускоренными электронами еще мало изучено. В последние десятилетия было установлено [38] наличие резкого снижения сопротивления металла деформированию и повышение его пластичности под влиянием электрического тока большой плотности (порядка  $10^9$  А/м<sup>2</sup>) или под влиянием интенсивного электронного облучения. Это явление было условно названо электропластическим эффектом.

Результаты представленные в [40, 47] свидетельствуют о сохранении термофлуктуационной природы пластической деформации металлов в механизме электропластического эффекта и об эквивалентности действия тока приложению к кристаллам механического напряжения. Под действием напряжения дислокации разного знака двигаются термофлуктуационно в противоположные стороны с одинаковой по величине скоростью. Протекание же через металл электрического тока



с плотностью  $j$  приводит к тому, что дислокации, перемещающиеся вдоль направления тока (дислокации положительного знака), ускоряют свое движение под влиянием силы увлечения, а дислокации другого знака (отрицательные дислокации) свое термофлуктуационное перемещение замедляют под влиянием той же силы. Изменение направления тока приводит к смене по отношению к нему ролей дислокаций разного знака. Таким образом, можно ожидать наличия зависимости термофлуктуационного вклада в электропластический эффект от направления тока, обусловленной различием между плотностями дислокаций разного знака.

Результатом действия тока высокой плотности на пластическую деформацию металла является существенное (на десятки процентов по сравнению с эквивалентным тепловым действием) увеличение пластичности и снижение сопротивления деформированию испытываемых образцов [39, 42, 44, 49, 50]. Вместе с тем при особом режиме пропускания тока наряду с электронным ускорением может реализовываться электронное торможение пластической деформации [45].

В указанных работах учитывалось влияние следующих побочных факторов: пондеромоторного, или пинч-эффекта, связанного с действием собственного магнитного поля тока; теплового эффекта; скин-эффекта или отгеснения тока к поверхности. В работах [67-69] глубина скин-слоя соответствовала диаметру образца и отгеснение тока к поверхности отсутствовало. Радиальная компонента тензора напряжения  $p$  при пинч-эффекте рассчитывалась по формуле

$$p = \mu j^2 (R^2 - a^2) / 4$$
, где:  $\mu$  - магнитная постоянная;  $a$  - расстояние от оси образца;  $j$  - плотность тока;  $R$  - радиус образца. Для титана, при  $R = 0,05$  см и  $j = 5000$  А/мм<sup>2</sup>, уменьшение осевого напряжения за счет пинч-эффекта составляло 0,4% от общего изменения деформирующего напряжения в пластической области. Таким образом, авторы пришли к выводу, что пинч-эффект довольно мал и не может существенно влиять на величину действия тока. Пинч-эффект является масштабным фактором и для образцов малого диаметра он не должен наблюдаться. По данным работ [67-69] уже при радиусе образцов ~0,25 мм пинч-эффект не оказывает какого-либо действия на электропластическую деформацию титана. Что касается образцов радиусом ~0,5 мм, то в этом случае влияние пинч-эффекта убывает с уменьшением плотности тока в соответствии с формулой  $p = 1,6 \cdot 10^{-2} (jR)^2$  по квадратичному закону.

Наиболее важным является выделение тепловой составляющей действия тока. В работах [67-69] этот вопрос рассматривался в двух аспектах: 1) влияние тока на величину скачка деформирующего напряжения за счет теплового расширения образца; 2) влияние тока на величину скачка деформирующего напряжения за счет термической активации пластической деформации.

Тепловая энергия, выделяемая в образцах во время действия тока, определялась по формуле  $\Delta Q = I^2 R t$ , а изменение температуры равно  $\Delta T = \Delta Q / C_p$ , где:  $R$  - электрическое сопротивление образцов;  $t$  - длительность импульсов тока;  $C_p$  - теплоемкость. Для образцов титана при 78К и  $j = 2000 \div 10000$  А/мм<sup>2</sup> температура изменялась в интервале 8-225 К [70], при этом не учитывалось охлаждение окружающей средой. Изменение деформирующего напряжения, обусловленное повышением температуры, определялось из графика зависимости  $\Delta \sigma = f(T)$  - изменение деформирующего напряжения, при постоянной скорости деформации.

По совокупности рассмотренных экспериментальных работ авторы [38] делают вывод о том, что прямое физическое действие тока (помимо теплового и пондеромоторного) является самостоятельным явлением, в основе которого лежит электрон-дислокационное взаимодействие, приводящее к срыву дислокаций с препятствий и к увлечению их движущимися электронами проводимости. Необходимым условием такого взаимодействия является превышение скорости дрейфа электронов над фазовой скоростью упругих волн дислокаций, а для неподвижных дислокаций - превышение длины свободного пробега электронов над расстоянием между дислокациями в кристалле.

В последнее время появились работы [26, 27], в которых исследовано совместное влияние пластической деформации материала и джоулева тепла на динамику роста трещины в проводящем материале с током. Обнаружено, что эффективное взаимодействие двух диссипативных процессов приводит к появлению “мягкого” режима возбуждения в системе. Представляется необходимым развить аналогичное исследование для задачи электропластичности в растягиваемом стержне.

Что касается влияния электрического тока на процесс шейкообразования, то автору известна только работа [32], в которой выполнены расчеты условий образования и развития шейки при пропускании импульсов электрического тока через растягиваемый стержень. На основе результатов расчета в [32] сделан вывод о том, что электрический ток

не влияет на образование шейки, а оказывает лишь общее пластифицирующее влияние на материал стержня. Однако в [32] отсутствует убедительное доказательство этого вывода, и для получения достоверных результатов решения этой проблемы требуется дополнительное исследование.

### 1.3. Пластическое деформирование наводороженных металлов

Известно, что водород, растворенный в твердом теле существенно меняет его механические свойства [18]. Так, например, опыты в [72], выполненные при скорости деформирования  $\dot{\epsilon} = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ , показали значительное изменение диаграммы деформирования при растяжении, увеличение растрескивания и появление полос локализации сдвиговой деформации в аустенитных нержавеющей сталях в широком диапазоне концентрации растворенного водорода. При этом в [72] установлено, что водородное охрупчивание образцов проявляется по разному даже для близких по составу и структуре материалов, но, в целом, отмечено смещение диаграммы деформирования в область высоких напряжений.

Среди задач о деформировании наводороженного образца представляет интерес исследование влияния несплошностей на распределение растворенного водорода в нем. В таком образце наблюдается уменьшение хрупкости с повышением скорости деформирования [18]. Обычно это явление объясняют тем, что при пластической деформации зарождаются и растут поры, которые являются стоками для атомов водорода. Если деформация проходит медленно, то водород из объема металла успевает диффундировать в поры, понижает свою концентрацию в сплошном материале и поддерживает в порах высокое давление вплоть до разрушения. При быстрой деформации водород не успевает стекать в поры и водородная хрупкость исчезает. Согласно [18], водород заполняет поры очень быстро; так, например, заполнение пор с объемной долей 0,05% и диаметром 1мкм при комнатной температуре происходит за 0,67 с. С другой стороны, при стоке водорода через внешнюю поверхность для снижения концентрации водорода вдвое в образце диаметром 3 см потребуется 12 суток. Эти оценки подчеркивают эффективность деформационных пор как стоков для растворенного водорода по сравнению с газообменом на поверхности образца.

Диффузия водорода к стокам - не единственный механизм переноса водорода в образце [18]. В последние годы нашла эксперимен-

тальное подтверждение гипотеза о дислокационном переносе водорода в деформируемом образце. Согласно этой гипотезе дислокации выходят на поверхность пор, а водород, связанный с дислокациями, освобождается, переходит в полость и молекулется, повышая давление молекулярного водорода в поре. Эта модель механизма миграции водорода помогла понять ряд особенностей процесса деформирования и разрушения наводороженных твердых тел. По мнению автора, приведенные в [18] описания процесса деформирования наводороженных образцов неполны, поскольку они не учитывают снижение концентрации растворенного водорода между несплошностями. Данное снижение обусловлено обоими механизмами переноса водорода: диффузией по решетке и границам зерен, а также дислокационным переносом.

Плотность потока  $J$ , т.е. количество вещества, диффундирующего в единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярную потоку вещества, пропорциональна пространственному градиенту концентрации водорода  $C$  [54]:

$$J = -D \text{grad} C, \quad (1.3.1)$$

где  $D$  - коэффициент диффузии.

Для одномерной задачи уравнение (1.3.1) переходит в первый закон Фика:

$$J = -D \partial C / \partial X. \quad (1.3.2)$$

Если коэффициент диффузии не зависит от концентрации, то из первого закона Фика вытекает второй закон Фика в виде

$$\partial C / \partial t = D \partial^2 C / \partial X^2, \quad (1.3.3)$$

который описывает изменение концентрации  $C$  в направлении  $X$  во времени  $t$ .

Диффузия водорода в поле упругих напряжений описывается уравнением [18]:

$$\partial C / \partial t = D \nabla^2 C - (D \bar{V}_H / R \theta) \nabla C \nabla \sigma_h - (D \bar{V}_H / R \theta) C \nabla^2 \sigma_h, \quad (1.3.4)$$

где  $\theta$  - температура,  $\bar{V}_H$  - парциальный молярный объем,  $R$  - газовая постоянная,  $\sigma_h$  - гидростатическое напряжение.

Повышение плотности дислокаций приводит к увеличению количества водорода, поглощенного металлом при той же величине внешнего давления водорода. Расчеты показывают, что равновесие между атомами водорода и дислокациями устанавливается в процессе охлаждения металла даже при закалке в воде.

Для водорода необходимо учитывать и его транспортировку движущимися дислокациями [19, 20]. Были получены достаточно убе-