

5 Физическая природа поведения материалов при поверхностном упрочнении

5.1 Особенности поведения упрочненных материалов на мезомасштабном уровне

В соответствии с общими принципами физической мезомеханики структурно неоднородных материалов процессы пластической деформации в общем случае осуществляется одновременно и взаимосвязано на различных масштабных уровнях. Процессы на более высоких масштабных уровнях, пока возможна релаксация напряжений в зоне действия концентратора напряжений одного масштабного уровня механизмами деформации более низкого уровня.

В физической мезомеханике процесс пластической деформации на каком-либо масштабном уровне рассматривается как результат потери сдвиговой неустойчивости на данном уровне. Поверхностные слои твердых тел по своей природе находятся в особом состоянии. Силы межатомных взаимодействий в этих слоях ослаблены, механические свойства материала в поверхностном слое отличны от механических свойств внутренних объемов. Поэтому один из принципов физической мезомеханики материалов состоит в том, что, как правило, местами возникновения концентраторов напряжений разного масштабного уровня является поверхность. Базовые (начальные, первичные концентраторы напряжений при этом обычно зарождаются в местах приложения внешней нагрузки (например, захваты испытательной машины при статических испытаниях). Экспериментально показано, что первичные сдвиги на микромасштабном уровне и связанные с ними дислокации в нагруженном твердом теле зарождаются на его поверхности. Микродеформация в поверхностных слоях начинается при нагружении материала ниже предела текучести.

При нагружении поверхностно упрочненных образцов ситуация меняется.

Во-первых, высокотвердый поверхностно упрочненный слой задерживает процессы пластической деформации поверхностных на микроуровне. Тормозится образование дислокаций, в поверхностном слое. Тормозится и выход дислокаций из внутренних объемов на поверхность (увеличиваются так называемые силы изображения), затрудняется формирование деформационного рельефа, то есть затормаживаются процессы пластической деформации на микроуровне не только поверхностных, но и внутренних объемов деформируемого тела. Таким образом, напряжения, необходимые для начала пластической деформации в результате поверхностного упрочнения повышаются, то есть поверхностное упрочнение повышает эффективный предел текучести.

Во-вторых, в поверхностно упрочненных материалах появляется новая поверхность: граница между упрочненным поверхностным слоем и неупрочненной (подложкой). Механические свойства материала по обе стороны границы, как правило, существенно различны. Поэтому при их совместном нагружении на границе упрочненный слой - подложка создаются

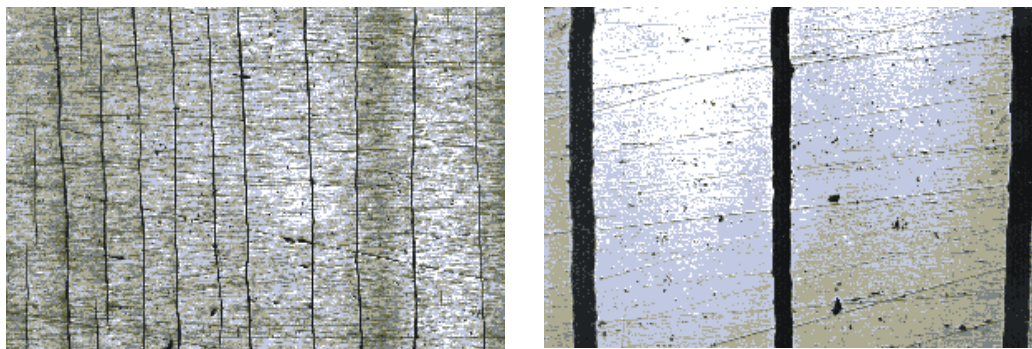
локальные контактные напряжения, имеющие осциллирующий характер. Периодичность пиковых значений этих напряжений определяется в первую очередь соотношением механических свойств слоя и подложки и их геометрических параметров. Места пиковых значений следует рассматривать как КН мезомасштабного уровня.

Вследствие указанных особенностей при механическом нагружении поверхностно упрочненных образцов с самого начала ведущим становится процесс деформации на мезомасштабном уровне. Поэтому изучение процессов пластической деформации поверхностно упрочненных материалов на мезомасштабном уровне представляет большой интерес с точки зрения оценки влияния различных способов поверхностного упрочнения на эксплуатационные свойства изделий и прогнозирования их работоспособности.

Далее рассмотрены некоторые явления, происходящие в поверхностно упрочненном материале с позиций физической мезомеханики структурно неоднородных материалов.

5.2 Структурные изменения материала поверхностного слоя

Фрагментирование поверхности. Исследования процесса растяжения поверхностно упрочненных образцов показали, что релаксация пиковых значений осциллирующих контактных напряжений высокотвердом в упрочненном слое происходит путем образования квазипериодической системы поверхностных микротрещин, ориентированных нормально оси образца (рис. 29). Частота распределения микротрещин соответствует, очевидно, частоте



а б
Рис.29. Поверхность растянутых образцов с различной толщиной упрочненного слоя; а - 25, б - 110 мкм; х40

пиковых значений осциллирующих контактных напряжений. С увеличением толщины упрочненного слоя эта частота уменьшается, а с уменьшением разницы в свойствах слоя и сердцевины (создаваемым термической обработкой) - увеличивается (рис.30). С увеличением деформации процесс фрагментации поверхности эволюционирует. Эволюция заключается в том, что на упрочненной поверхности появляются новые

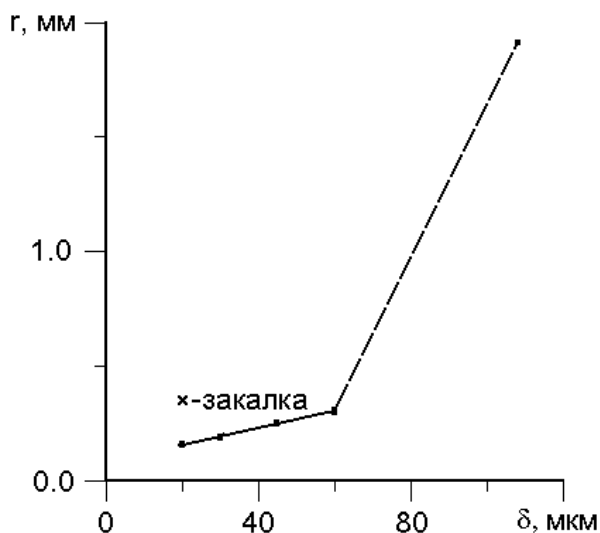


Рис. 30. Зависимость межтрещинных расстояний от толщины упрочненного слоя на отожженной стали 65X13

микротрещины, делящие ранее образовавшиеся фрагменты поверхности на более мелкие (вторичная фрагментация). При этом на определенной промежуточной стадии деформации, когда новые микротрещины делят только часть ранее образовавшихся фрагментов, распределение расстояний между трещинами приобретает бимодальный характер, который исчезает при больших деформациях (рис. 31). Характерно, что практически процесс вторичной фрагментации поверхности происходит в весьма узком интервале деформаций (около 1%).

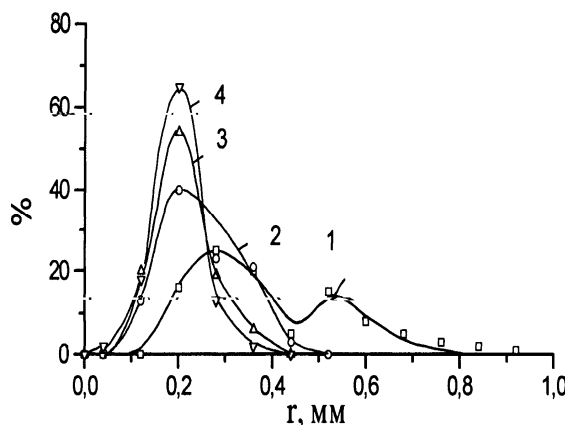


Рис. 31. Распределение величины межтрещинных расстояний в зависимости от степени деформации

Фрагментирование в объеме.
 При достижении напряжения течения неупрочненного материала, практически одновременно с образованием первых микротрещин на упрочненных гранях, на гранях с удаленным упрочненным слоем образуются две сопряженных системы полос локализованной деформации), распространяющихся от поверхностных микротрещин вглубь образца под углом 45° к его оси (рис. 32). Взаимно пересекаясь эти полосы формируют в объеме образца мезоструктуру (расстояния

между микротрещинами и полосами локализованной деформации соответствуют мезомасштабному уровню). Внутри этих полос процессы пластической деформации идут на более низких масштабных уровнях (рис. 32в). Степень развития мезополос, то есть степень распространения

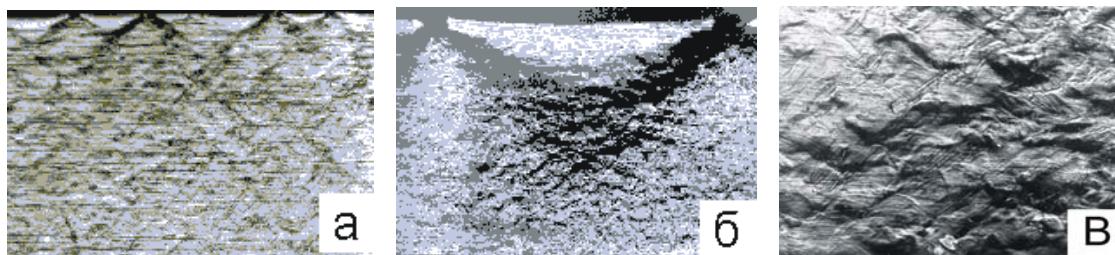


Рис. 32. Мезоструктура на поверхности деформированного образца; х: а-100, б-600, в-1000

мезоструктуры в объеме образца, определяется эффективностью поверхностных мезо КН, которая в свою очередь зависит от толщины упрочненного слоя. Заметим, что эффективность мест пиковых значений осциллирующих контактных напряжений как мезоКН усиливается образовавшимися в этих местах поверхностными трещинами.

Влияние толщины упрочненного слоя. В зависимости от глубины распространения мезополос от поверхности вглубь поверхностно упрочненного образца, (определяемой толщиной упрочненного слоя) можно выделить три варианта протекания процесса пластической деформации: распространение ПЛД менее, чем на половину толщины образца (рис. 33 а), больше, чем на половину толщины (рис. 33 б) и на всю толщину образца (рис. 33 в). В первом случае мезоструктура формируется в приповерхностных слоях, а сердцевина ведет себя как в неупрочненном образце. Во втором случае зоны с сформировавшейся мезоструктурой перекрываются, и мезоструктура формируется во всем объеме образца. Характерно, что в этих двух случаях

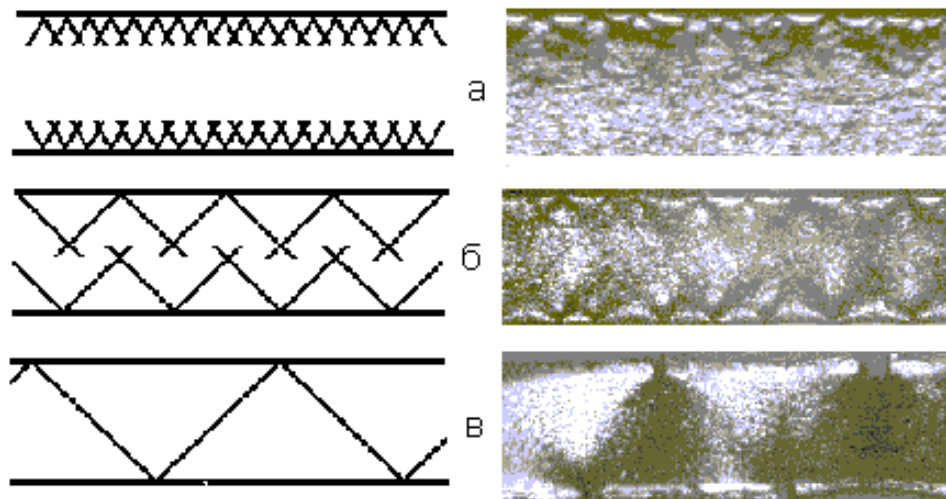


Рис. 33. Схемы и фотографии мезоструктур образцов с толщиной упрочненного слоя 20 (а), 45(б) и 110 мкм (в); x25

системы поверхностных микротрещин на противоположных упрочненных гранях образуются, по-видимому, независимо друг от друга. В третьем случае от одного из мезо КН на границе слой - подложка как от базового КН, усиленного образовавшейся в упрочненном слое микротрещиной, в неупрочненный объем распространяется полоса локализованной деформации. Достигнув противоположной упрочненной грани, она инициирует

возникновение на этой грани нового концентратора напряжений путем образования другой микротрещины, от которой в свою очередь в направлении максимальных касательных напряжений следует отраженная полоса в сторону противоположной грани, образуя следующий концентратор напряжений в виде микротрещины и так далее.

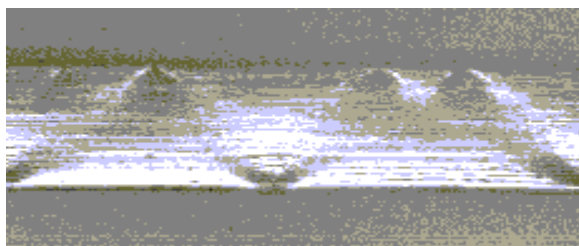
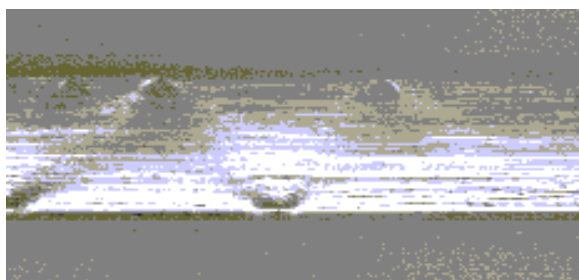
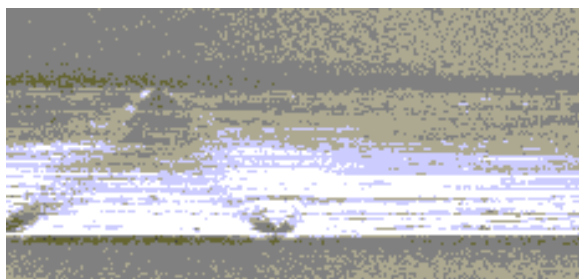


Рис.34. Распространение полосы локализованной деформации при растяжении образца с толщиной упрочненного слоя 110 мкм

Одиночные волны пластической деформации. В последнем варианте формирование систем микротрещин на противоположных упрочненных гранях образца происходит последовательно и взаимосвязанно. При этом связь между периодичностью расположения пиковых значений осциллирующих контактных напряжений и периодичностью системы поверхностных микротрещин нарушаются (на рис. 26 это наблюдается при толщине упрочненного слоя около 60 мкм). Такой процесс пластической деформации можно представить как прохождение вдоль образца одиночных волн пластической деформации (рис.34).

Их можно классифицировать как волны макромасштабного уровня деформации, поскольку размеры образующихся при их прохождении фрагментов соизмеримы с размерами образца. Основной вклад в пластическую деформацию в этом случае вносит движение этих фрагментов как целого, то есть с самого начала пластической деформации в этот процесс вовлекается и становится определяющим макромасштабный уровень деформации. Этому соответствует максимальная локализация деформации в полосах локализованной деформации.

В процессе нагружения вплоть до разрушения в образце может реализоваться одна или несколько волн локализованной деформации. Деформация путем прохождения одиночной волны наблюдается, когда материал обладает высокой пластичностью на микроуровне, и может

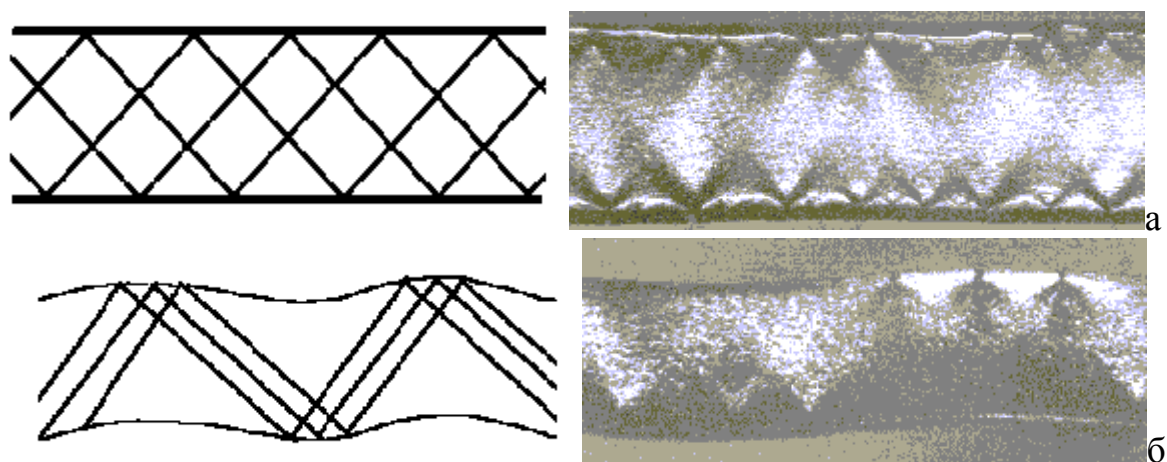


Рис.35. Схемы и фотографии мезоструктур, образующихся при прохождении волн локализованной деформации; а - волны равномерно распределены вдоль оси образца, б- волны сгруппированы; x25

происходить весьма сильная локализация деформации в макрополосах. В этом случае поперечная составляющая деформации образца, обусловленная встречным движением соседних мезообъемов в волне локализованной деформации, вызывает осциллирующее формоизменение образца (рис. 33в).

Как правило, в подобных случаях деформация происходит путем прохождения вдоль оси образца нескольких волн. Вызванная этим деформация образца является суммой деформаций, обусловленных прохождением каждой волны. Поэтому, если места максимумов расположены достаточно равномерно вдоль оси образца, поперечная деформация от прохождения каждой волны в значительной мере компенсируется, и ось образца остается практически неизменной (рис. 35а). Если же максимумы волн группируются, то в результате суммирования поперечных деформаций ось образца заметно искривляется (рис.35б).

Движение мезообъемов по схеме “сдвиг+поворот”. После формирования мезоструктуры в результате взаимодействия мезополос локализованной деформации, дальнейшая пластическая деформация в основном реализуется путем движения элементов этой мезоструктуры (мезообъемов) как целого по схеме “сдвиг плюс поворот”. Мезообъемы могут вдавливаться в образец,

экструдирова материал соседних объемов (рис. 36 а), поворачиваться (рис. 36 б). Смежные мезообъемы могут смещаться в противоположных направлениях. На рис. 36 в мезообъемы (трехгранные призмы) обращенные вершинами к верхней

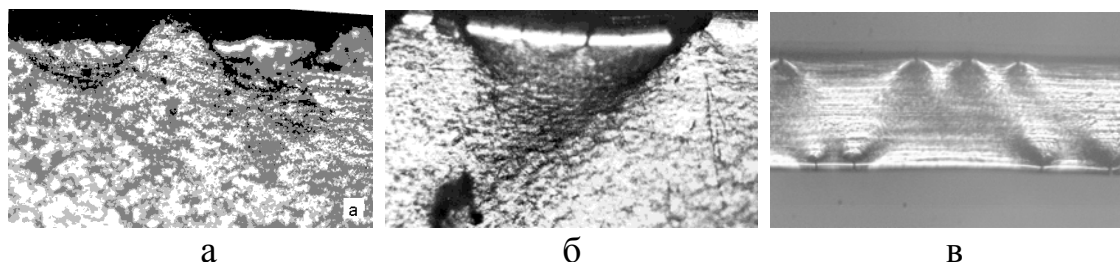


Рис. 36. Движение мезообъемов как целого; х: а , б - 400, в - 30

упрочненной поверхности смещаются вдоль оси призмы смещаются в направлении от наблюдателя, а обращенные вершинами к нижней упрочненной поверхности - к наблюдателю. Поскольку основания призм более жестко

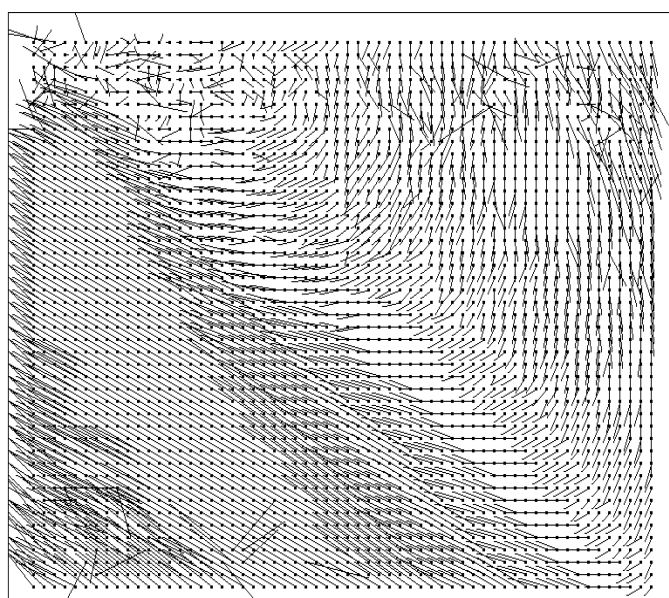


Рис.37 Мезоструктура ПЛД; х200

связаны с внутренним объемом образца, смещаются преимущественно вершины призм (на рисунке вершины треугольников, обращенные к верхней поверхности - светлые, а к нижней - темные). На рис. 37 показано движение двух мезообъемов друг относительно друга, наблюдаемое с помощью картины полей векторов смещений.

При движении мезообъемы взаимодействуют друг с другом, и в них, а также в разделяющих их полосах локализованной

деформации создается сложнапряженное состояние, что вызывает необходимость аккомодационных процессов. Такими процессами могут быть деформация на микроуровне внутри мезообъемов, возникновение деформационных доменов, вторичная фрагментация исходных мезообъемов на более низких масштабных уровнях.

Вторичная фрагментация. На упрочненной поверхности и в приповерхностных мезообъемах релаксация напряжений, создающихся в результате взаимодействия мезообъемов происходит путем образования дополнительных микротрещин на упрочненной поверхности (что обуславливает описанную выше эволюцию распределения межтрещинных расстояний с увеличением степени деформации), а в упрочненном объеме - дополнительных полос локализованной деформации, которые делят ранее образовавшиеся мезообъемы на более мелкие фрагменты, геометрически подобные исходным мезообъемам (рис.38).

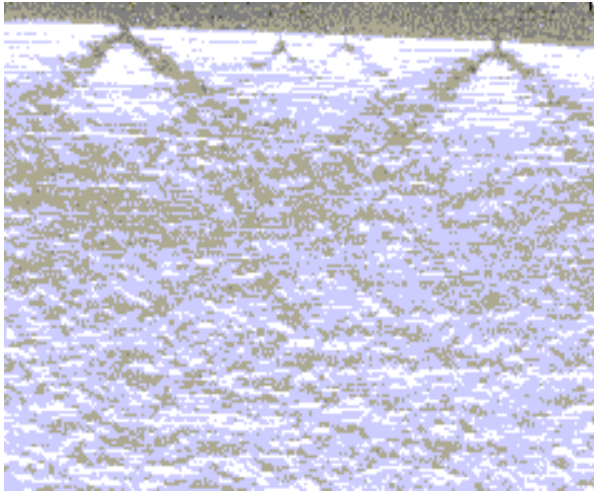


Рис.38. Разделение крупного приповерхностного мезообъема на более мелкие; $\times 260$

Внутри крупных (первичных) мезообъемов как аккомодационный процесс может также происходить формирование доменной субструктуры. На рис. 39 приведены картины полей векторов смещений на боковой поверхности с удаленным упрочненным слоем, где локализация пластической деформации привела к образованию мезополосы, ориентированной нормально оси образца, которую можно интерпретировать как “мезошейку”. Эта полоса начинается от поверхностной микротрещины,

зародившейся на упрочненной поверхности образца. На начальных стадиях деформации эта “мезошейка” разделяет достаточно крупные мезообъемы прямоугольной формы. На рис 39б приведено распределение продольной компоненты ϵ_{xx} тензора дисторсии для картины, приведенной на рис. 39а. Видно, что на этой стадии нагружения пластическая деформация в пределах мезообъемов практически не происходит, а на их границах наблюдается значительные скачки ϵ_{xx} . С увеличением степени деформации, в условиях создающегося сложноподвиженного состояния, в исходных мезообъемах, как результат аккомодационного процесса, образуются прямоугольные деформационные домены более низкого масштабного уровня (рис. 39 в).

Модулирование пластической деформации. Неоднородность состава, структуры, свойств, напряженного состояния, наличие КН разного масштабного уровня вызывают неравномерность пластической деформации в объеме деформируемого материала. Необходимость сопряжения участков с различной величиной деформации приводит к появлению осциллирующих напряжений на границах этих участков, что обуславливает образование волнообразной формы границ и приграничных слоев, то есть модуляцию деформации (гофрирование). Масштабный уровень (размеры) гофров соответствует масштабному уровню деформации. В литературе обсуждается модуляция деформации на микроуровне. Хорошо известно гофрирование на макроуровне, например при прокатке металла. Как отмечалось выше, практически с самого начала пластической деформации поверхностно упрочненных материалов процесс на мезомасштабном уровне является ведущим, что делает поверхностно упрочненные образцы удобным объектом для изучения процессов пластической деформации на мезоуровне. Это относится и к явлению гофрирования.

На рисунке 36 а представлена гофрированная поверхность, образовавшаяся при растяжении азотированного образца. Поскольку в приповерхностных слоях процесс пластической деформации с самого начала

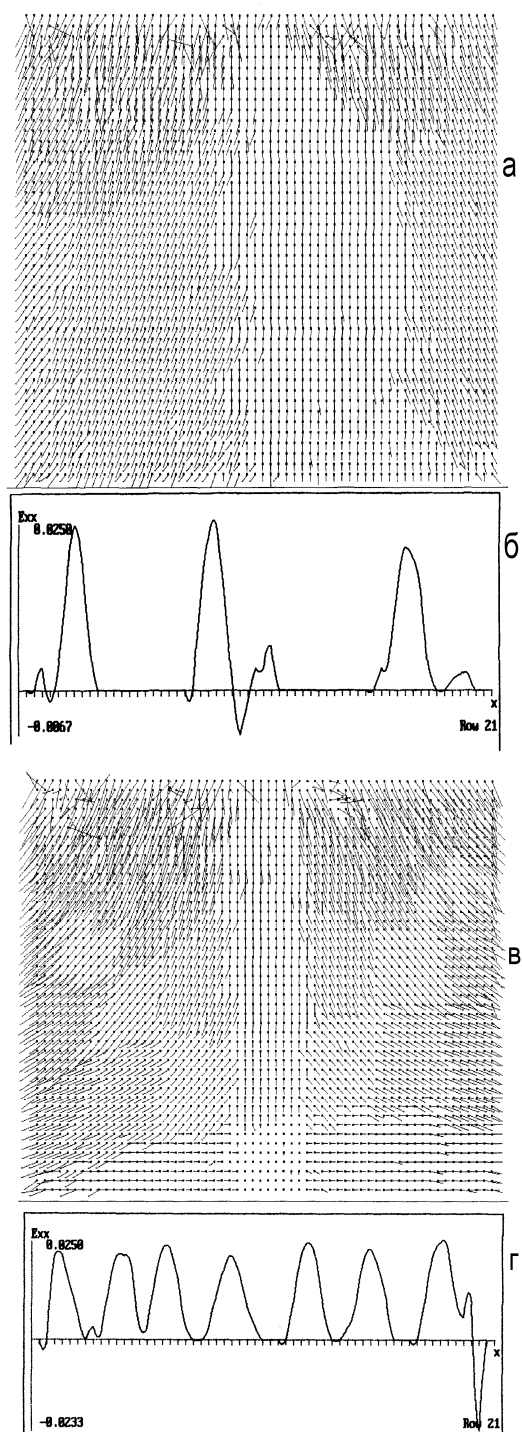


Рис.39. Поля векторов смещений (а,в) и распределение E_{xx} вдоль оси образца (б,г); а,б - $\epsilon=6\%$; в,г - $\epsilon=8\%$

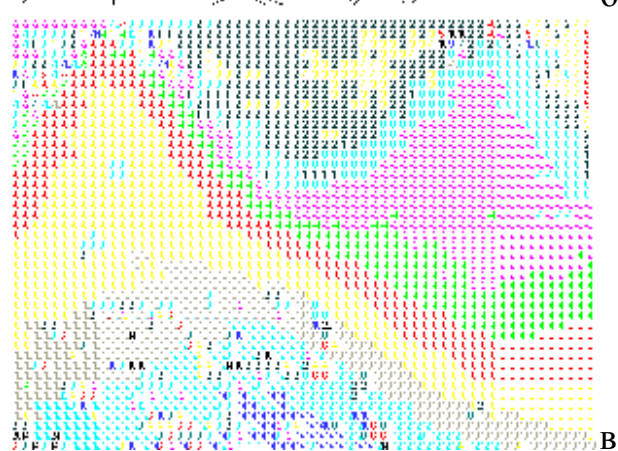
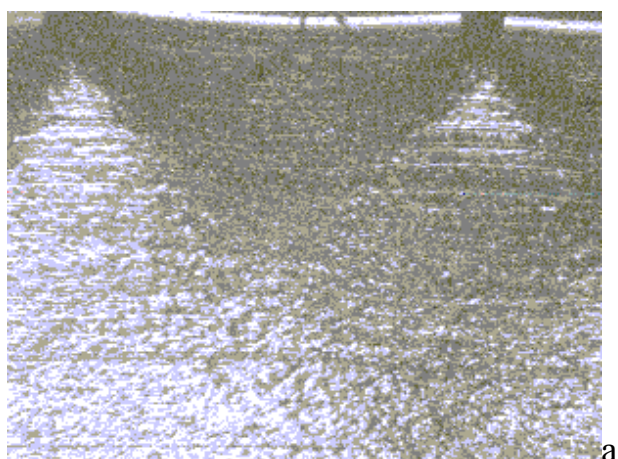
реализуется на мезоуровне, обеспечивающем большую величину деформации, чем процесс на микроуровне в объеме образца, неизбежно происходит гофрирование поверхности, необходимое для сопряжения деформированных поверхностных и внутренних объемов.

Рисунок 33а иллюстрирует образование двух гармоник пластической деформации разного масштабного уровня при растяжении образца с упрочненным слоем 20 мкм: крупные серые треугольники являются результатом модуляции деформации на более высоком мезомасштабном уровне, а мелкие светлые треугольники около упрочненной поверхности — следствие модуляции на более низком уровне. Периодичность первой модуляции около 80 мкм, второй около 40 мкм.

На рисунке 40 приведены фотография поверхности, картина поля векторов смещений на поверхности (где удален упрочненный слой) деформированного образца и картина распределения значений поперечной (относительно оси образца) компоненты этих векторов (40 в). На последней особенно четко видно наличие двух гармоник пластической деформации с периодами примерно 250 и 500 мкм.

Таким образом, достаточно общей закономерностью пластической деформации поверхностно упрочненных материалов по-видимому можно считать образование более чем одной гармоник пластической деформации, за счет чего

осуществляется согласование пластической деформации поверхностных слоев и сердцевины. Возможно, эти процессы сопровождаются появлением менее выраженных гармоник пластической деформации других масштабных уровней. В то же время при исследовании деформации поверхностно упрочненных образцов с толщиной упрочненного слоя менее 10 мкм использованными в работе методами наблюдали только одну гармонику.



На рис. 39 а показана граница между двумя мезообъемами, образовавшимися в процессе пластической деформации. При дальнейшей деформации на границе возникают осциллирующие напряжения, вызывающие волнообразное искривление (гофрирование) этой границы. При усилении взаимодействия соседних мезообъемов вследствие увеличения внешней нагрузки, в этих мезообъемах происходит формирование доменной структуры, что можно рассматривать как процесс, предшествующий фрагментации. Доменная структура не выявляется металлографически, но хорошо видна на картине полей векторов смещений (рис. 39 в). Характерно, что размеры доменов соответствуют периодичности гофров границы между мезообъемами. Таким образом, есть основания говорить о связи процессов гофрирования и фрагментации.

При достаточно большой толщине упрочненного слоя (и сравнительно небольшой толщине образца) размеры гофров, образующихся при деформации, становятся соизмеримыми с размерами образца, то есть можно

Рис.40. Фотография (а), поле векторов смещений (б) и распределение поперечной компоненты векторов смещений (в); толщина слоя - 65мкм, $\epsilon - 9,5+0,1\%$; $\times 100$

говорить о модулировании деформации на макроуровне (рис. 33в, 35б).

5.3 Принцип масштабной инвариантности

Важнейшей такой закономерностью пластической деформации с позиций физической мезомеханики материалов является принцип масштабной инвариантности процессов деформации на разных масштабных уровнях. Это проявляется при сопоставлении процессов деформации на микроуровне, хорошо описанных в литературе, и на мезоуровне при деформации поверхностно упрочненных материалов.

Для деформации на микроуровне характерны три типа сдвигов, обуславливающих в общем случае трехстадийность процесса и, соответственно, три участка на кривой течения. При деформации поверхностно упрочненных материалов, происходящей на мезоуровне, наблюдается стадийность, аналогичная стадийности процесса на микроуровне. Однако, при этом стадия, соответствующая первой стадии (легкого скольжения) при деформации на микроуровне, связанная с неестественным поворотом, отсутствует. Это обусловлено неизбежностью образования с самого начала деформации одновременно двух сопряженных систем мезополос локализованной деформации, ориентированных в направлении максимальных касательных напряжений (поскольку направление оси образца жестко зафиксировано). Процесс пластической деформации начинается с образования, распространения и взаимодействия (пересечения) мезополос локализованной

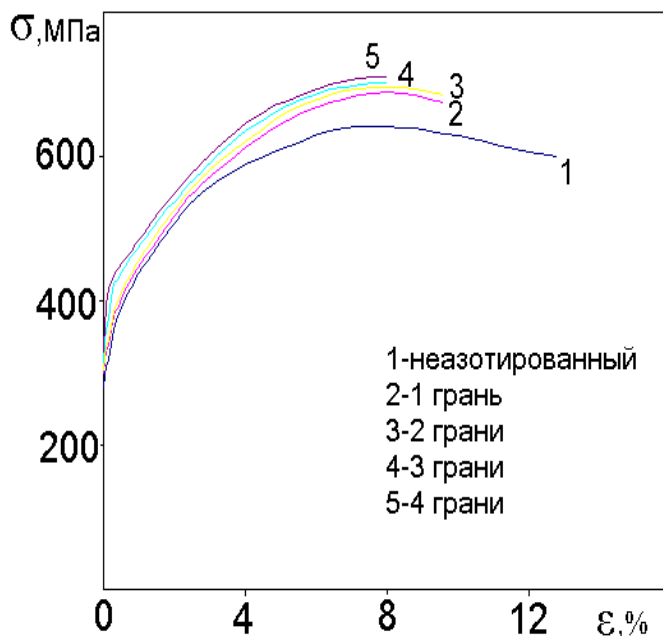


Рис.41. Кривые течения образцов с разным количеством упрочненных граней

деформации, и это соответствует второй стадии процесса деформации на микроуровне, реализующегося путем множественного дислокационного скольжения (стадии линейного упрочнения).

На рисунке 41 приведены кривые течения поверхностно упрочненных образцов квадратного сечения с разным количеством упрочненных граней. Около каждой грани при нагружении формируется две системы сопряженных мезополос локализованной деформации. Видно, что чем больше количество упрочненных граней, то есть чем больше

количество непараллельных друг другу систем мезополос, тем больше коэффициент линейного упрочнения на этой стадии деформации.

Характерна аналогичность в строении микро- и мезополос локализованной деформации: микрополосы (пачки скольжения) являются совокупностью линий скольжения, и мезополосы тоже имеют сложное строение и состоят из подполос (рис. 37). В то же время следует отметить, что в отличие от деформации на микроуровне, образование мезополос обусловлено некристаллографическим сдвигом в направлениях максимальных касательных напряжений.

Анализ кривых течения и картин полей векторов смещений на поверхности деформируемых образцов показывает, что деформация поверхностно упрочненных образцов на мезоуровне на третьей стадии (параболического упрочнения) происходит путем движения элементов мезоструктуры по схеме “сдвиг +поворот”. Напомним, что этой стадии при деформации на микроуровне соответствует механизм деформации путем движения элементов ячеистой дислокационной структуры, то есть можно говорить о масштабной инвариантности процессов пластической деформации и на этой стадии.

Еще одним проявлением принципа масштабной инвариантности уже в пределах мезомасштабного уровня можно считать наблюдаемое геометрическое подобие элементов первично образующейся мезоструктуры и мезоструктуры, более низкого уровня, формирующейся при увеличении деформации в результате вторичной фрагментации. Это относится и к поверхностным мезообъемам (рис. 38) и к мезообъемам, в которых формируются при дальнейшем нагружении деформационные домены с границами, параллельными границам исходных мезообъемов.

Механические свойства и разрушение. Блокирование движения дислокаций на поверхности и усиление роли процессов на мезоуровне при нагружении поверхностно упрочненных материалов обуславливает увеличения сопротивления деформации поверхностно упрочненных образцов. С увеличением толщины упрочненного слоя этот эффект усиливается, однако, при достаточно большой толщине слоя (в обсуждаемом эксперименте более 50 мкм) предел прочности уменьшается, что, очевидно, объясняется усилением роли поверхностных трещин как КН и соответствующим усилением локализации деформации. Последним, видимо, объясняется и уменьшение пластичности образцов.

Таким образом, уменьшение пластичности поверхностно упрочненных образцов может быть объяснено повышением масштабного уровня деформации с самого начала нагружения. В физической мезомеханике материалов считается, что процесс разрушения начинается с начала пластической деформации: при деформации на каждом уровне происходит образование несплошностей соответствующего уровня. Выход на

макроуровень сопровождается образованием макронесплошностей и завершается разрушением.

При нагружении поверхностно упрочненных образцов с самого начала появляются несплошности мезомасштабного уровня: трещины в поверхностном слое. В результате движения мезообъемов как целого, эти трещины распространяются по мезополосам локализованной деформации. С увеличением деформации и усилением роли макромасштабного уровня одна из таких трещин (там, где происходит максимальная локализация деформации) становится макротрещиной. Это может произойти там, где совмещаются максимумы гармоник модуляции пластической деформации (рис.40 в), то есть при нагружении поверхностно упрочненных образцов расположения места локализации деформации на макроуровне и последующего разрушения имеет не стохастический характер, а детерминировано в том смысле, что оно связано с периодичностью модуляций пластической деформации, определяемой толщиной упрочненного слоя.

Деформация и разрушение при изнашивании. Одной из основных целей поверхностного упрочнения (в том числе азотирования) является повышение износостойкости. Процесс изнашивания неразрывно связан с пластической деформацией приповерхностных слоев материала. Поэтому, процессы изнашивания, особенно в случае поверхностно упрочненных материалов, целесообразно рассматривать с учетом представлений физической мезомеханики материалов.

Металлографические исследования показывают, что на упрочненных изнашиваемых поверхностях образуются квазипериодические системы

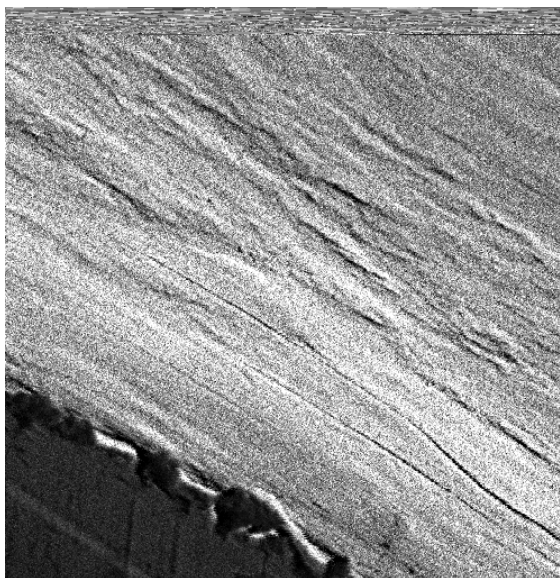


Рис.42. Зона заторможенной деформации, х600

микротрещин, аналогичные тем, что образуются при статическом нагружении поверхностно упрочненных материалов. Под упрочненным слоем наблюдали образование заторможенной на микроуровне деформации. Толщина этой зоны находится в пределах десятков микрометров. За ней располагается зона (слой) локализованной деформации (рис. 42). Характерно, что он состоит из многих подслоев (аналогично тому, как при деформации на микроуровне пачки скольжения представляют собой совокупность линий скольжения). По этой зоне в процессе изнашивания происходит сдвиг упрочненного слоя и зоны заторможенной деформации

относительно основного объема образца. При толщине упрочненного слоя 10 мкм ширина слоя локализованной деформации, определенная металлографически, составляет 30 - 60 мкм, а суммарная величина сдвига верхней части образца относительно нижней 15 - 30 мкм. Измерения микротвердости показали, что, вследствие деформационного упрочнения, микротвердость слоя локализованной деформации значительно увеличивается: если микротвердость зоны заторможенной деформации и внутренней части образца составляет 450 - 500 МПа, то микротвердость зоны локализованной деформации достигает 700 - 750 МПа, что подтверждает сильную локализацию пластической деформации в этом слое.

От поверхностных трещин на изнашиваемой поверхности происходит распространение мезополос локализованной деформации. На

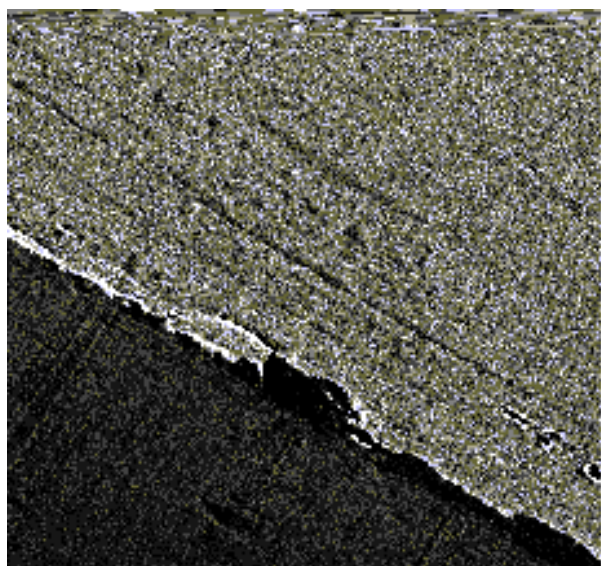


Рис.44. Разрушение упрочненного слоя, х600

некотором расстоянии от поверхности эти мезополосы замыкаются друг на друга. При этом происходит аннигиляция мезокН и фрагментация приповерхностных слоев (рис 43 а). В дальнейшем по мезополосам распространяются трещины, и изнашивание может происходить путем выкрашивания образовавшихся мезообъемов. Наблюдали также вторичную фрагментацию: квазипериодическое растрескивание первичных мезообъемов на более мелкие (рис. 43 б). По-видимому, этим можно объяснить известный из литературы бимодальный характер распределения по размерам частиц

износа. При толщине слоя более 110 мкм процессы пластической деформации и разрушения локализуются в пределах упрочненного слоя (рис. 44). В этом

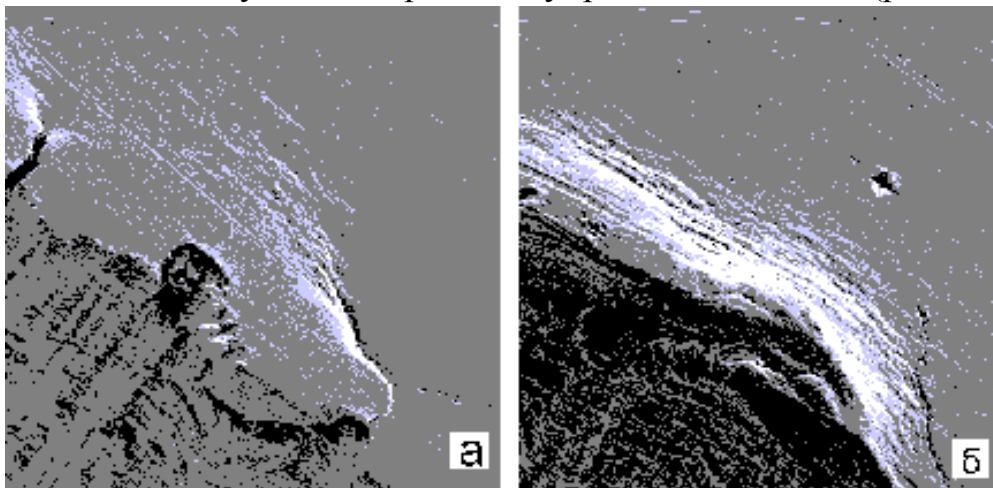


Рис.43. Первичная (а) и вторичная (б) фрагментация при изнашивании, х600

случае механизмы изнашивания и износостойкость определяются свойствами материала слоя.

Таким образом, при изнашивании поверхностно упрочненных материалов в приповерхностных слоях происходят процессы пластической деформации на мезоуровне (образование поверхностных трещин, мезоПЛД, фрагментация), во многом сходные с процессами при статическом нагружении и предопределяющие процесс изнашивания.