

Модель формирования структуры разрушения в слое с упрочненными приповерхностными зонами

Р.В. Гольдштейн, В.Е. Панин¹, Н.М. Осипенко, Л.С. Деревягина¹

Институт проблем механики РАН, Москва, 119526, Россия

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634021, Россия

Работа посвящена теоретическому анализу механизмов множественного растрескивания упрочненных поверхностных слоев при растяжении плоских образцов сталей 65X13 и 12X1МФ с двухсторонним поверхностным упрочнением. Рассмотрено влияние распространения зигзагообразной макрополосы локализованного сдвига в объеме деформируемого образца на развитие поверхностных трещин. Даны энергетические оценки условия образования и распространения в объеме образца макрополосы локализованного сдвига.

Model of the formation of the fracture structure in a layer with hardened near-surface zones

R.V. Goldstein, V.E. Panin¹, N.M. Osipenko, and L.S. Derevyagina¹

Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, 119526, Russia

¹ Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, 634021, Russia

The paper analyzes theoretically multiple cracking of hardened surface layers in tension of surface-hardened, flat 65Cr13 and 12Cr1MoV steel specimens. The effect of propagation of a zigzag localized shear band in the tensile specimen bulk on surface cracking is considered. The energy of localized shear macroband formation and propagation in the specimen bulk is estimated.

1. Введение. Взаимодействие масштабов

Ранее [1], рассматривая упорядоченные структуры, возникающие при разрушении материалов, роль исходной структуры или представительного элемента гетерогенной среды отводили собственно элементам, определяющим локальную прочность материала, его внутреннюю конструкцию. К таким элементам, например, относили поры или включения.

Если изучаемый объект имеет конечные размеры и конструкцию, обуславливаемую его функциональным назначением, взаимодействие механических процессов в характерных масштабах, присущих этому объекту, при его разрушении должно учитывать эти конструктивные параметры. Одним из удобных примеров для анализа механизма реализации упорядоченного разрушения де-

тали может служить разрушение образца, включающего в себя элементы покрытия и пластическую основу (подложку). Эксперименты, описанные в ряде работ [2–5], с образцами-пластинами из пластичного металла (сталь 65X13, 12X1МФ) с упрочненными поверхностными слоями (азотирование путем ионной имплантации и др.), действительно, показали развитие упорядоченных структур разрушения упрочненного поверхностного слоя.

Рассмотрим эти эксперименты более тщательно. Плоские образцы-лопаточки размерами 15×3×0.9 мм (или 30×3×1.5 мм) с упрочненным поверхностным слоем лицевых граней и отожженные для снятия внутренних напряжений (глубина азотирования от 20 до 120 мм) растягивали с постоянной скоростью движе-

ния захватов (~0.08 мм/мин) вплоть до появления системы параллельных трещин на поверхностях образца. Конфигурация расположения трещин по длине образца является предметом настоящего исследования.

Первый поверхностный разрыв появлялся, как правило, в области галтелей. После этого растрескивание поверхности распространялось по всему образцу со средней скоростью порядка 3 мм/мин.

На боковых поверхностях, не подвергнутых азотированию, наблюдали картину поочередного возникновения трещин как при посредстве локализованных пластических сдвигов, распространяющихся под углом ±45° к оси растяжения и последовательно «отражающихся» от границ упрочненных слоев, так и без поочередного «отражения» локализованных сдвигов или в комбинации того и другого механизмов. После развития первоначальной системы трещин дальнейшее деформирование приводило к разделению некоторых промежутков между трещинами на 2-3 части. Разрушение завершалось пластическим разрывом образца по одному из начальных локализованных сдвигов. Примеры диаграмм нагружения и картины образующейся системы трещин приведены на (рис. 1, 2) [5]. Пример распределения по размерам расстояний между поверхностными трещинами для характерных уровней деформации приведен на рис. 3 для аналогичного материала.

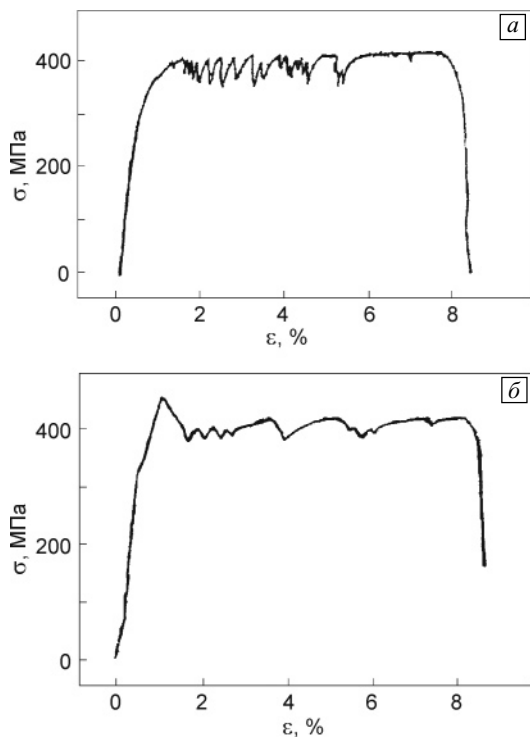


Рис. 1. Диаграмма деформирования образцов стали с упрочненным покрытием (по [2]): а, б соответствуют рис. 2, а, б

Анализ кривых распределения Δl (по данным [5]) показал, что:

1. При больших деформациях расстояния между трещинами стабилизируются на некотором минимальном уровне (рис. 4), причем этот уровень возрастает с ростом толщины.

2. Величины Δl , соответствующие двум максимумам распределения при больших деформациях, возрастают при увеличении толщины упрочненного слоя и стабилизируются на уровнях $\Delta l_{\max_1} \sim 0.3$ мм, $\Delta l_{\max_2} \sim 0.5 \div 0.6$ мм.

3. Максимальные фиксированные размеры Δl (крайние правые точки на кривых распределения) линейно возрастают с увеличением толщины упрочненного слоя (рис. 4). Это относится как к малым ($\epsilon \sim 0.5\%$), так и к большим деформациям ($\epsilon \sim 4\%$).

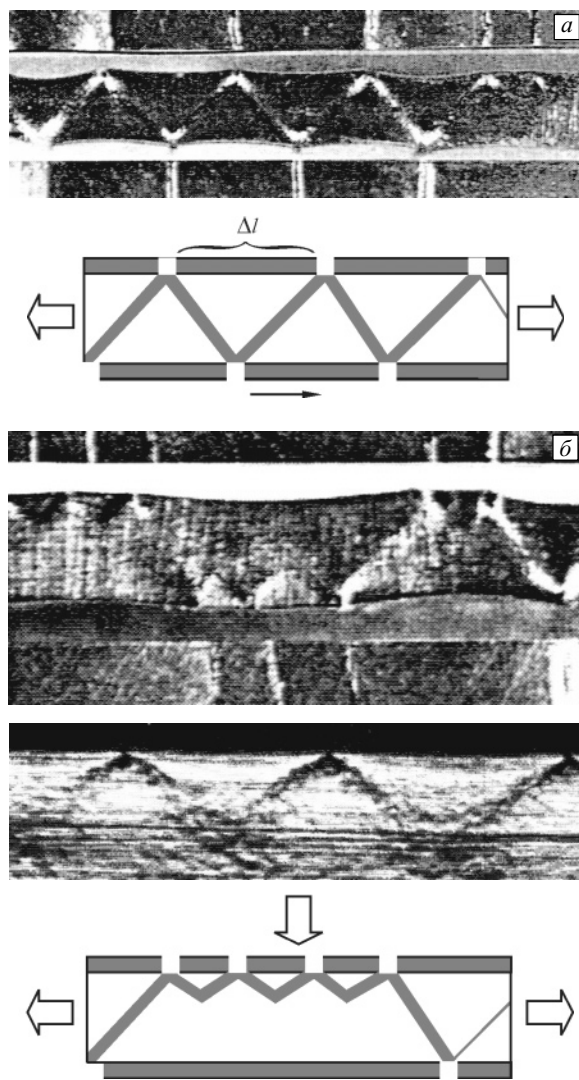


Рис. 2. Полосы локализованной деформации на боковых (неупрочненных) гранях образцов и трещины на упрочненных гранях (по [2]). Толщина упрочненного слоя $h = 120$ (а); 45 мкм (б)

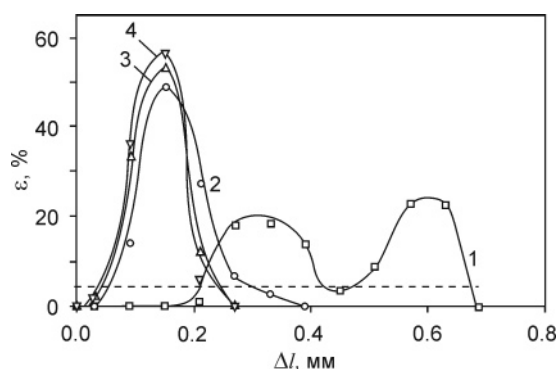


Рис. 3. Пример распределения расстояний между трещинами в упрочненном слое толщиной 30 мкм (по [5]): $\epsilon = 0.5$ (1); 1 (2); 2 (3); 4 % (4)

Наблюдения показывают [5], что в образцах с толщиной упрочненного слоя более $100 \div 120$ мкм трещины в упрочненных слоях возникают только в связи с прохождением локализованных пластических сдвигов. Распределение по размерам промежутков между ними имеет один выраженный максимум, приходящийся на $1.8 \div 2$ мм (удвоенная толщина образца), что соответствует геометрической картине движения полос локализованной деформации и «отражения» их от поверхностей. В [2] этот процесс назван движением волны переключения полос. При малых толщинах упрочненного слоя (≤ 20 мкм) развитие разрушения на начальном этапе не связано с движением локализованной деформации и распределение по размерам промежутков между ними практически также имеет один максимум, не коррелирующий с толщиной образца (~ 0.22 мм). В промежуточном диапазоне толщин упрочненного слоя при малых (~ 0.5 %) деформациях распределение расстояний между трещинами имеет два выраженных максимума.



Рис. 4. Изменение расстояний между трещинами при вариации толщины упрочненного слоя и на разных стадиях деформирования

Появление полос локализованной деформации и последовательное распространение разрывов в режиме чередования на одной или другой поверхности вызывает смещение срединной плоскости образца в целом в поперечном направлении и изгиб участков упрочненного металла между трещинами. Поверхностные трещины образуются последовательно от очага, расположенного в области захватов. На кривых деформирования (рис. 1) образованию каждой трещины соответствует сброс нагрузки. Когда образуется пакет трещин, на кривой видны пакеты сбросов нагрузки.

Сказанное позволяет построить следующую качественную картину процесса разрушения во взаимодействии масштабов, определяемых представительными размерами. Характерными уровнями масштабов в данном примере являются следующие: масштаб образца в целом (характерный размер — длина образца), масштаб его поперечного размера (толщина основы) и масштаб, определяемый толщиной упрочненного слоя.

При появлении первого и каждого очередного разрыва в образце в целом меняется распределение напряжений по толщине. Дальнейшее развитие событий может идти по нескольким сценариям.

Если различие между прочностью поверхностных слоев σ_b и напряжением текучести материала основы σ_y велико, а упрочненные поверхностные слои составляют заметную часть толщины образца, энергии, высвобождаемой при первичном разрыве (поверхностного слоя), достаточно для развития полосы локализованной пластической деформации от первичного разрыва до противоположной стороны образца. В результате в окрестностях вершины этой полосы (приближающейся к упрочненному поверхностному слою на противоположной стороне образца) к этому слою переносится область концентрации напряжений. Они дополняют поле напряжений от внешних нагрузок (некоторую роль играет изгиб образца при появлении первичного разрыва). Суммарные напряжения оказываются достаточными, чтобы инициировать разрыв упрочненного слоя. Если это произойдет, ситуация может повториться и распространиться по образцу дальше (при сохранении уровня внешних напряжений или поддержании некоторой скорости деформирования образца), так что образуется периодическая система трещин, отстоящих друг от друга на расстоянии порядка удвоенной толщины (рис. 2, а). Заметим, что в случае слабого сцепления поверхностных слоев с основой вместо разрыва поверхностного слоя может произойти расслоение в области выхода полосы деформации к границе поверхностного слоя.

В другом варианте, при относительно малой толщине внешних упрочненных слоев, при первичном разрыве слоя энергии недостаточно для движения полосы деформации. Для развития локализованной деформации

в основе необходимо обеспечить значительно большую деформацию, чем получающаяся в результате одного разрыва. Этот уровень деформации создается группой разрывов, отстоящих друг от друга на значительно меньшее расстояние, чем в первом случае. Механизм возникновения этих разрывов связан с процессами однородной пластической деформации в области материала основы, примыкающей к разрыву. Образуется система разрывов с двумя максимумами распределения.

Наконец, в предельном варианте, когда влияние поверхностных слоев на деформацию образца мало, условия распространения системы хрупких разрывов упрочненных слоев на поверхностях образца отличаются от условий локализации деформации в пластической полосе сдвига. Системы разрывов на двух сторонах образца перестают быть связаны друг с другом. Периодичность разрывов определяется только условиями совместного деформирования поверхностного слоя и примыкающей к нему области основного металла. В этом случае кривая распределения размеров промежутков между разрывами снова характеризуется одним максимумом.

В настоящей статье рассмотрим развитие процессов, относящихся ко второму варианту схемы разрушения, в которой значимы все три масштабных уровня. На первом этапе анализа вариациями напряжений вследствие изгиба образца при появлении разрывов будем пренебрегать.

Рассмотрим более детально механизмы квазихрупкого разрушения поверхностных слоев в двух наблюдаемых вариантах: без влияния локализованной полосы сдвига (упругая полуполоса, соединенная с растягиваемым пластическим слоем) и в присутствии такого влияния (локализованный сдвиг изменяет поле напряжений в упругой растягиваемой полосе).

2. Механизм растрескивания без участия полос локализованного сдвига

Разрушение упрочненного слоя малой толщины, не связанное с развитием полос локализованного сдвига, может быть объяснено в рамках взаимодействия однородного пластического деформирования материала основы и совместного с ним упругого деформирования упрочненного слоя. Напомним, что такого рода задачи возникают при интерпретации картины разрушения хрупких лаковых покрытий.

Наблюдаемая картина разрушения существенно отличается от прогнозируемой для упругохрупкого разрушения покрытий на растягиваемой упругой подложке. Как показано в [6], в последнем случае максимальные избыточные растягивающие напряжения возникают в центре ограниченной пластины покрытия, что приводит к последовательному разделению участков пластины покрытия на две равные части. В отличие от такой схемы разрушения при пластической деформации подложки можно ожидать появления трещин вблизи края

пластины покрытия по мере распространения в подложке фронта пластических деформаций. По нашему мнению, такая схема разрушения более правомерна для наблюдаемой картины разрушения упрочненного слоя (рис. 2).

Наиболее простой вариант механизма разрушения в последнем случае соответствует симметричной расчетной схеме вытягивания пластического слоя из щели, образованной шероховатыми плитами (рис. 5). Последние имитируют упрочненный слой. Если в начальном приближении пренебречь изгибной жесткостью упрочненного слоя, можно принять, что на границе между ним и пластической подложкой нормальные напряжения незначительны. Тогда, как и в задачах теории пластичности о сдавливании пластического слоя шероховатыми жесткими плитами [7] (задача Прандтля) и о выдавливании пластического слоя через фильеру с параллельными стенками, вблизи границы отверстия-щели характеристики пластического деформирования в пристеночном пластическом слое имеют вид двух ортогональных семейств прямых. Это соответствует условию $\tau = \text{const}$ на границе между подложкой и покрытием. Такое условие выполняется практически сразу после начала пластического течения, так как уровень пластических деформаций намного выше, чем уровень упругих деформаций упрочненного слоя в продольном направлении (если материал подложки деформируется с упрочнением, касательные напряжения будут меняться по длине контакта).

Если в качестве условия инициирования разрушения в упрочненном слое принять достижение там предельных нормальных напряжений σ_b

$$\sigma_x = \sigma_b, \tag{1}$$

из условий равновесия следует

$$\int_0^{\Delta \ell} \tau^*(x) dx = h \sigma_b.$$

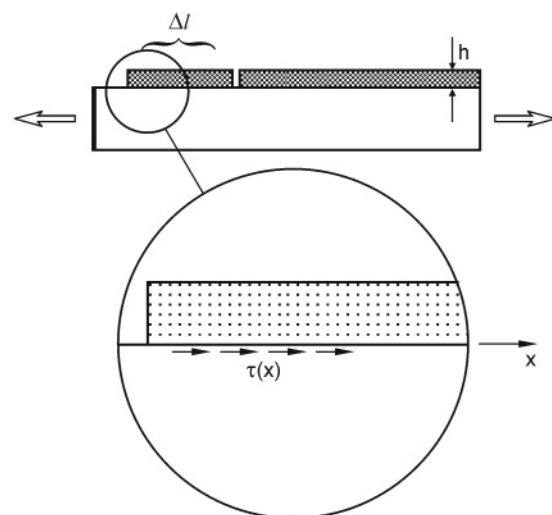


Рис. 5. Схема разрушения без участия полос локализованного сдвига

В случае $\tau^* = \text{const}$ получаем простое соотношение

$$\Delta \ell \tau^* = h \sigma_b, \quad (2)$$

где $\Delta \ell$ — расстояние от края предыдущего разрыва упрочненного слоя; τ^* — напряжение на границе между упрочненным слоем и пластической подложкой; h — толщина упрочненного слоя.

Отсюда расстояние между соседними трещинами в последовательно развивающемся ряду будет

$$\Delta \ell = \frac{h \sigma_b}{\tau^*}. \quad (3)$$

Заметим, что в этом случае величина $\Delta \ell$ не зависит от толщины пластического слоя (или толщины образца H) и пропорциональна толщине упрочненного слоя.

Из-за эффекта упрочнения в реальном варианте разрушения величина τ^* увеличивается при росте величины деформации. Этим объясняется факт уменьшения и стабилизации размеров $\Delta \ell$ в максимуме распределения при росте суммарной деформации образца (рис. 4). Наименьшие размеры $\Delta \ell$ при разделении более крупных блоков соответствуют ситуации, когда в этих блоках (в силу их относительно небольших размеров) при дальнейшем увеличении деформаций напряжения разрыва уже не могут быть достигнуты.

На рис. 2 видно, что трещины, возникающие без участия полос локализованного сдвига, пересекающих все сечение образца, группируются в ближайшей окрестности этих полос (оперяют их), причем расстояние между трещинами в каждой группе значительно меньше, чем расстояние между трещинами, определяемыми полосами скольжения на одной и той же стороне пластины (~2 см). По мере увеличения толщины h расстояния в группах трещин, приуроченных к полосам, возрастают в среднем до некоторого характерного момента, когда соседние группы сближаются настолько, что расстояния между крайними трещинами в группах становятся близки к таковым внутри групп. Этим фактически выделяется размер $\Delta \ell \sim 0.6 \div 0.65$ мм как треть расстояния между полосами локализованного сдвига, что объясняет особую роль упомянутого размера на кривых распределения размеров $\Delta \ell(h)$ — размер $\Delta \ell$ между группами совпадает с максимальным размером в группе.

Следует иметь в виду, что кривые распределения $\Delta \ell$ получены для образцов, в которых фиксирована суммарная деформация. В силу конечной скорости распространения фронта растрескивания упрочненного слоя различные части образца находятся при фактически различающихся уровнях деформации. В связи с этим только максимальные фиксируемые размеры расстояний соответствуют уровню, присущему началу процесса растрескивания, и, вероятно, отмечаются в наиболее удаленной от области инициирования разрушения части образца.

3. Модель разрушения с участием локализованного сдвига

Уровень деформации, соответствующий началу разрушения, можно оценить, используя модель локализованного сдвига Дагдейла механики квазихрупкого разрушения [8].

В данном случае в роли трещины выступает поперечное сечение разрыва в упрочненном слое, а пластическая подложка под ним (материал основы) в области разрыва покрытия — аналог среды, в которой реализуется пластическая концевая зона.

Напомним, что в моделях типа Дагдейла взаимосвязь между раскрытием трещины в вершине δ и длиной сосредоточенного сдвига c находится из условия компенсации раскрытия трещины при пластическом сдвиге другими деформациями окрестного материала

$$E \varepsilon = \sigma_y,$$

где $\varepsilon \sim \delta/c$.

Отсюда

$$\delta \sim m \frac{\sigma_y}{E} c, \quad (4)$$

где σ_y — напряжение текучести; E — модуль упругости; m — коэффициент (в случае модели Дагдейла $m \approx 8/\pi$).

При разрушении упрочненного покрытия с каждым разрывом связаны две полосы сосредоточенного сдвига, наклоненные под углом π/h к плоскости образца. Поэтому для компенсации раскрытия разрыва в продольном направлении эффективный размер сдвига соотносится с его проекцией на ось образца, т.е. $c \sim c^*/\sqrt{2}$, где c^* — длина растущего сдвига (рис. 6). В таком случае в (4) $m \sim 2/\sqrt{2} = \sqrt{2}$. В момент прорастания сдвига на всю глубину пластически деформируемого слоя ($c \sim H$) формула (4) приобретает вид:

$$\delta^* \sim \frac{2\sigma_y}{E} H. \quad (5)$$

Отметим, что в данной модели величина δ не зависит от толщины упрочненного слоя h .

Положим далее для примера, близкого к условиям экспериментов в [2, 5], $H \sim 0.9$ мм; $\sigma_y \sim 400$ МПа, $E \sim 200$ ГПа. Отсюда $\delta^* \sim 3.6$ мкм — начальное раскрытие разрыва. Для оценки области, охваченной ростом полос

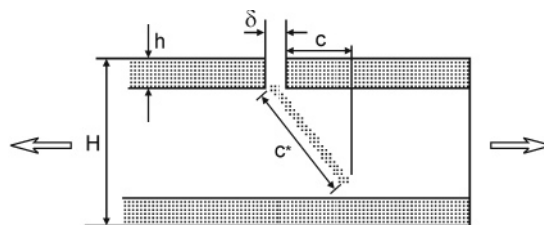


Рис. 6. Схема развития одиночной полосы локализованного сдвига после разрыва упрочненного слоя

локализованного сдвига, найдем неупругую деформацию на базе расстояния между двумя разрывами, приуроченными к полосам сдвига ($\Delta l \sim 1.8$ мм):

$$\varepsilon_{ост} \sim \frac{\delta^*}{\Delta l} \approx 0.2 \%. \quad (6)$$

Для достижения такой неупругой деформации при постоянном среднем напряжении (см. диаграмму нагружения, рис. 1) по всей длине образца ($l \sim 30$ мм) требуется перемещение захватов на величину Δu

$$\Delta u \sim \varepsilon_{ост} l = 0.06 \text{ мм}. \quad (7)$$

При обозначенной скорости перемещения захватов $\dot{u} \sim 0.08$ мм/мин перемещение на Δu занимает время

$$t_1 \sim \Delta u \dot{u} \approx 0.75 \text{ мин}. \quad (8)$$

Зная среднюю скорость распространения волны неупругих деформаций и растрескивания поверхности образца ($v \sim 3$ мм/мин), можно оценить искомый размер области рабочей части образца, на которой происходит первоначальное растрескивание:

$$s_1 \sim vt \sim 2.25 \text{ мм}. \quad (9)$$

Наименьшая деформация, при которой измеряли величины расстояний между разрывами Δl_i , составляет 0.5 %. Для такой деформации область растрескивания $s_2 \sim 6$ мм.

Таким образом, анализируя распределения расстояний между разрывами, необходимо учитывать существенную неравномерность неупругого деформирования образца по его длине. В частности, при остаточной деформации ~ 0.5 % только треть области, охваченной растрескиванием, граничащая с неповрежденной частью образца, характеризует начальную стадию процесса разрушения. В связи с этим на кривых распределения для $\varepsilon \sim 0.5$ % полезно выделить наибольшие размеры фиксируемых расстояний между трещинами как характеризующие начальную фазу разрушения. Эти данные помещены на рис. 4. Можно видеть, что наибольшие фиксируемые размеры Δl представляют линейную функцию толщины упрочненного слоя, причем для $h < 120$ мкм они существенно меньше расстояния между соседними выходами полос локализованного сдвига ($\sim 1.8 \div 2$ мм).

Это означает, что в исследованном диапазоне h распространение фронта разрушения даже на начальном этапе предполагает совместное развитие двух альтернативных механизмов разрушения: приуроченного к полосам сдвига и вызванного распространением пластической деформации вдоль границы упрочненного слоя.

Рассмотрим систему сил, обеспечивающих равновесие на участке образца, примыкающем к вновь образованному разрыву при условии инициирования в его окрестностях полосы локализованного сдвига в пластическом материале основы. Эффектами глобального изгиба пока пренебрежем. При появлении разрыва упрочненного слоя последний разрушается, переноса нагруз-

ку на пластически деформируемую подложку и берега растущего локализованного сдвига. Заметим, что если упрочненный слой имеет значительную толщину, его разрыв вызывает перегрузку оставшегося сечения образца. Поскольку материал подложки находится в состоянии пластического деформирования, он воспринимает дополнительную деформацию разрыва (локализованную в полосу), а дополнительная нагрузка в основном приходится на упрочненный слой на противоположной стороне образца (рис. 7).

Схема передачи нагрузки представляется следующей. При постоянстве среднего внешнего нагружения растяжения σ_0 в момент образования разрыва средние напряжения в оставшемся сечении будут равны

$$\bar{\sigma} \sim \sigma_0 \frac{H}{H-h}. \quad (10)$$

Поскольку пластический слой не может обеспечить сопротивление дополнительной нагрузке (в нем $\tau^* \approx \text{const}$), по линии локализованного сдвига образуется дополнительная сдвиговая сила $(\bar{\sigma} - \tau^*)(H-h)$, обеспечивающая добавочные напряжения в оставшемся упрочненном слое. Порядок величины добавочных напряжений:

$$\Delta \sigma \sim \frac{(\bar{\sigma} - \tau^*)(H-h)}{h}, \quad H \gg h. \quad (11)$$

Используя в качестве условия разрушения достижение предельных напряжений σ_b , запишем для этого условия

$$\bar{\sigma} + \Delta \sigma = \sigma_b \quad (12)$$

или

$$\sigma_0 H \frac{2}{H-h} = \sigma_b h + \tau^* (H-h),$$

отсюда

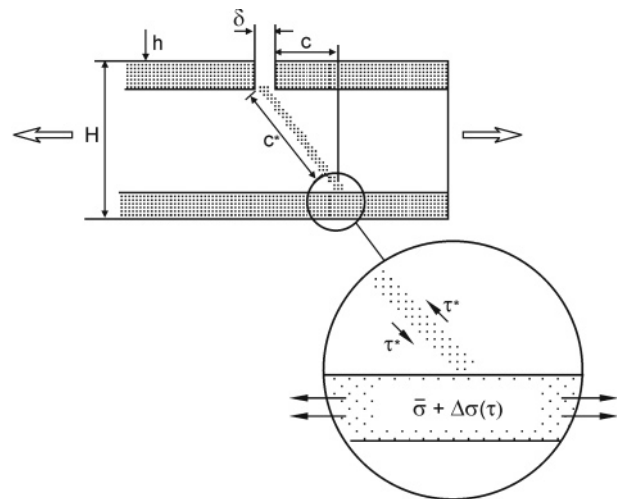


Рис. 7. К оценке достаточного условия инициирования разрушения упрочненного слоя под влиянием локализованного сдвига

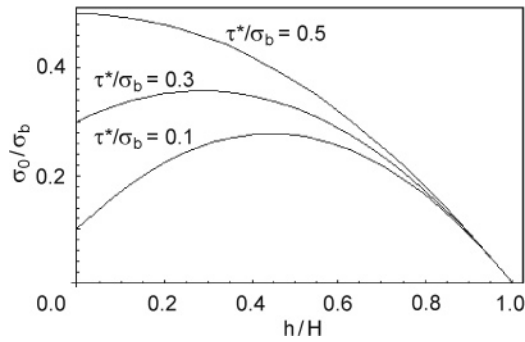


Рис. 8. Изменение относительной прочности образца с упрочненным покрытием при росте толщины покрытия

$$\sigma_0 = \sigma_b \frac{h}{H} \left(1 - \frac{h}{H} \right) + \tau^* \left(1 - \frac{h}{H} \right)^2 \quad (13)$$

или при $H \gg h$

$$\sigma_0 \approx \sigma_b \frac{h}{H} + \tau \left(1 - 2 \frac{h}{H} \right).$$

Функция $\sigma_0 \frac{h}{H}$ (рис. 8) немонотонна при значениях $\frac{\tau^*}{\sigma_b} \leq 0.5$.

Положение максимума определим условием

$$\frac{d\sigma_0}{d\left(\frac{h}{H}\right)} = 0. \quad (14)$$

Отсюда соотношение толщин, обеспечивающих максимум σ_0 , равно

$$\left(\frac{h}{H}\right)^* = \frac{1 - 2 \frac{\tau^*}{\sigma_b}}{2 \left(1 - \frac{\tau^*}{\sigma_b} \right)}. \quad (15)$$

Вид функции $\left(\frac{h}{H}\right)^* \left(\frac{\tau^*}{\sigma_b}\right)$ приведен на рис. 9.

По мере приближения значений $\frac{\tau^*}{\sigma_b}$ к 0.5 соотношение толщин упрочненного слоя (покрытия) и общей толщины пластины, обеспечивающее максимальную сопротивляемость растрескиванию, уменьшается. Относительная прочность пластины при растягивающих нагрузках для оптимального соотношения толщин $\left(\frac{h}{H}\right)^*$ из (13) определяется соотношением

$$\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_b}\right)_{\max} = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{\tau^*}{\sigma_b} \right)^{-1}. \quad (16)$$

Вид этой функции показан на рис. 10.

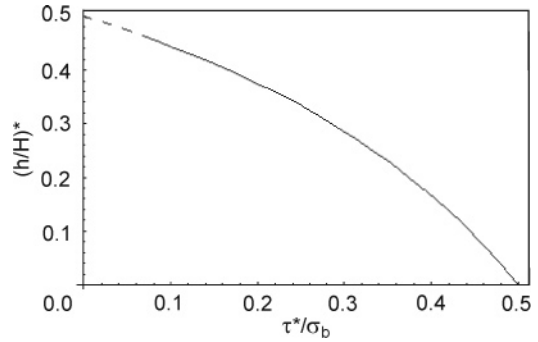


Рис. 9. Оптимальная относительная толщина покрытия для различных соотношений прочностей основного слоя металла и покрытия

Таким образом, показано, что при большом различии прочностных характеристик пластического материала основы и покрытия ($\tau^*/\sigma_b < 0.5$) возможна оптимизация конструкции плоской детали с покрытием, обеспечивающая максимальную сопротивляемость растрескиванию покрытия после появления первой трещины, если развитие разрушения происходит посредством прорастания полос локализованного пластического сдвига.

Если учесть, что $\tau^* \approx \sigma_y/2$, где σ_y — напряжение текучести основного металла, условие оптимизации, выглядит как ($\sigma_y/\sigma_b < 1$). В случае упрочнения поверхностных слоев ($\sigma_b > \sigma_y$) оптимизация возможна во всем диапазоне действия данного механизма разрушения.

4. Условия образования полосы локализованного сдвига (энергетические оценки)

Воспользуемся аналогией полосы локализованного сдвига и концевой области трещины пластического разрыва в модели типа Дагдейла (формулы (4), (5)). Удельная энергия при продвижении трещины может быть записана как [8]

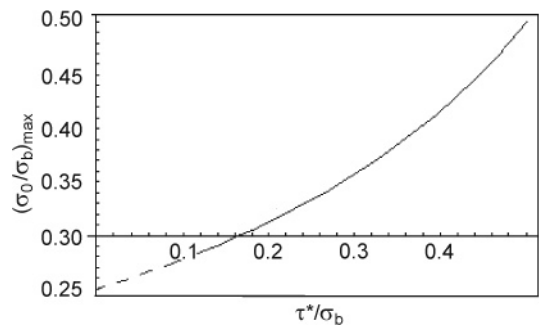


Рис. 10. Изменение несущей способности образца с оптимальным упрочненным слоем

$$\frac{\partial w}{\partial \ell} = \delta \sigma_y. \quad (17)$$

С учетом (4) запишем величину энергии, необходимую для развития локализованного сдвига. В (4) учтем, что раскрытие трещины δ в данном случае обусловлено одной полосой сдвига

$$w \sim \frac{\partial \sigma_y c}{2}, \quad (18)$$

где c — длина локализованного сдвига,

$$w_c \sim \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\sigma_y^2}{E} c^2. \quad (19)$$

Эта энергия обеспечивается изменением энергетического состояния окружающего материала. Учтем три компоненты этого изменения

$$w_0 = w_1 + w_2 + w_3, \quad (20)$$

где $w_1 \sim 2h^2 \frac{\sigma_b^2}{E}$ — упругая энергия, высвобождаемая локально в окрестностях разрыва в упрочненном слое; $w_2 \sim \sigma_b h \delta$ — работа при пластическом раскрытии разрыва в упрочненном слое при развитии полосы сдвига; $w_3 \sim (1/2) \Delta \sigma H \delta$ — работа нагружающего устройства по компенсации смещения, вызванного разрывом в упрочненном слое.

Величину $\Delta \sigma$ оценим через жесткость системы «образец – нагружающее устройство» E_{eff}^* :

$$\Delta \sigma \sim \frac{\delta}{L} E_{\text{eff}}^*, \quad (21)$$

где L — эффективная длина образца.

Приравняв w_c и w_0 , получим формулу взаимосвязи между толщиной упрочненного слоя и шириной полосы локализованного сдвига, образующейся при одиночном разрыве упрочненного слоя:

$$\sigma_y^2 c^2 \approx 2\sqrt{2} h^2 \sigma_b^2 + \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{\sigma_y^2 H E_{\text{eff}}^*}{LE} c^2 + \sigma_y \sigma_b c h. \quad (22)$$

Найдем отсюда размер полосы сдвига

$$c \approx \frac{\sigma_b h}{2\sigma_y} \frac{1 + \sqrt{1 + 8\sqrt{2} A}}{A}, \quad (23)$$

$$A = 1 - \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{E_{\text{eff}}^* H}{EL}.$$

Для реальных ситуаций упругая разгрузка при единичном разрыве упрочненного слоя мала (см. рис. 1, $\Delta \sigma / \tau^* \leq 1\%$). Поэтому приближенно можно записать с точностью до коэффициента m

$$c \approx m \frac{\sigma_b h}{2\sigma_y} \left(1 + \sqrt{1 + 8\sqrt{2}} \right) \approx 2.25 \frac{\sigma_b h}{\sigma_y} m. \quad (24)$$

Судя по микротвердости [9], прочность упрочненного слоя σ_b для исследованных сталей примерно в 2 раза выше таковой для основного материала. Длина

локализованного сдвига коррелирует с толщиной неупрочненной части образца при толщине упрочненного слоя $h \sim 0.12 \div 0.15$ мм [5]. Отсюда оценим коэффициент m при $c \sim \sqrt{2}(H - 2h) = \sqrt{2}(0.9 - 2 \cdot 0.12) = 0.93$ мм

$$m \approx \frac{c \sigma_y}{2.25 \sigma_b h} = \frac{0.93}{2.25 \cdot 0.12 \cdot 2} = 1.7. \quad (25)$$

Длина c коррелирует с толщиной образца ($c \sim \sqrt{2}(H - 2h)$), если толщина разрываемого слоя не менее некоторой критической величины (в нашем случае $h \sim 0.12$ мм).

Предложенная модель устанавливает линейную взаимосвязь между толщиной упрочненного слоя при его первичном разрыве и длиной образующейся при этом полосы локализованного сдвига.

Очевидно, что возможны несколько характерных ситуаций разрушения покрытия, связанных с процессом распространения полосы сдвига под влиянием первичного разрыва.

Если толщина покрытия велика, энергия, высвобождаемая при первичном разрыве, достаточна для прорастания полосы локализованного сдвига на всю толщину образца, так что становится возможным разрыв упрочненного слоя на противоположной стороне образца. Затем ситуация повторяется. В результате путем чередования разрывов (этот процесс назван в [2] волной переключения макрополос локализованной деформации) поверхность покрытия образца разбивается поперечными трещинами, расстояние между которыми весьма близко к удвоенной толщине материала основы образца. Дальнейшее дробление возможно при увеличении деформации. Если толщина упрочненного слоя мала, энергия, высвобождаемая при первичном разрыве, недостаточна для прорастания сдвига и инициирования разрушения на противоположной стороне образца.

Сравнивая (3) и (21), можно видеть, что они отличаются только коэффициентами. Это позволяет оценить ситуацию смены механизма разрушения.

В самом деле, в момент образования первичного разрыва из-за создаваемой им концентрации процессов деформации в пластическом слое возможно как прорастание полосы локализованного сдвига, так и пластическое проскальзывание материала на границе с покрытием. В последнем случае упрочненный слой, примыкающий к разрыву, нагружается. Из (3) и (24) для этих двух процессов можно записать

$$\frac{c}{\Delta \ell} \approx \frac{m \cdot 2.25}{2} \approx 1.9. \quad (26)$$

Здесь учтено в (3), что $\tau^* \sim \sigma_y / 2$.

Длина полосы локализованного сдвига примерно в два раза больше $\Delta \ell$ — расстояния до возможного разрыва на той же стороне пластины, где произошел первичный разрыв. Поэтому, если полоса сдвига не доходит

до противоположной стороны, реализуется разрыв на той же стороне по механизму накопления сдвиговых напряжений. Расстояние до него от первичного разрыва меньше, чем удвоенная толщина пластины. Критическая ситуация при этом наблюдается в случае прорастания полосы сдвига до противоположной стороны ($c \sim H\sqrt{2}$). Подставляя эту величину в (26), получим

$$\Delta l \approx \frac{\sqrt{2}}{1.9} H \approx 0.7H. \quad (27)$$

В частности, для имеющихся экспериментальных данных при $H \approx 0.9$ мм величина $\Delta l \approx 0.63$ мм.

По данным, приведенным на рис. 3, можно видеть, что уровень $\Delta l \sim 0.6$ мм является типичным уровнем, соответствующим одному из максимумов распределения вне зависимости от толщины покрытия. По нашему мнению, это связано с условиями экспериментов, при которых деформирование не прекращается при появле-

нии первых разрывов, и могут реализоваться оба механизма разрушения.

Развитие локализованного сдвига в образцах без покрытия происходит при существенно больших средних деформациях образца по сравнению с образцами, имеющими покрытие, разрывы в котором способствуют локализации деформаций. В частности, например, по данным [4, 9] в стали типа 65X13 без покрытия начало формирования шейки соответствует деформации $\epsilon \sim 6\%$, в то время как начало разрыва в покрытии фиксируется при $\epsilon \leq 0.5\%$. Скорость пластических деформаций в области разрывов на порядок выше, чем в среднем по образцу [1]. Это в целом соответствует представлениям о провокации локализационных явлений вблизи концентраторов напряжения при пластическом деформировании.

С этой точки зрения рассмотрим ситуацию разрушения, в которой для тонких (или слабых) поверхност-

Таблица 1

Карта механизмов разрушения при растяжении плоских пластин с двухсторонним упрочненным покрытием

Схема развития разрушения				
Описание процесса	<p><i>a, б</i> — образование квазипериодических не взаимодействующих систем разрывов на каждой стороне пластины по механизму накопления касательных напряжений на границе слоев при пластическом деформировании основного материала; <i>в</i> — окончательное разрушение при развитии одиночного локализованного пластического сдвига или образования шейки в материале основного слоя</p>	<p><i>a-в</i> — система разрывов обусловлена комбинацией механизмов разрушения под влиянием сквозных полос локализованной пластической деформации и накопления касательных напряжений на границах слоев. Окончательное разрушение при развитии одиночного пластического сдвига</p>	<p><i>a-в</i> — периодическая система разрывов упрочненного покрытия, образованная последовательным развитием сквозных полос локализованной пластической деформации в основном материале. Окончательное разрушение при развитии одиночного пластического сдвига</p>	<p><i>a-в</i> — хрупкий разрыв покрытия, связанный с одиночной сквозной полосой локализованной пластической деформации в основном материале. Окончательное разрушение при развитии одиночного пластического сдвига</p>
Характер распределения расстояний между разрывами в покрытии				

ных слоев при первичном разрыве по условиям нагружения невозможно прорастание полосы сдвига до противоположной стороны образца. В этом случае начальная фаза разрушения связана с появлением разрывов на одной стороне образца (возможно по обе стороны от первичного разрыва на расстояниях $\Delta\ell < 0.7H$). Каждый такой разрыв дает в свою очередь ограниченные локализованные сдвиги. Подобным образом можно интерпретировать, например, рис. 2, б.

Поскольку сдвиги от соседних разрывов в силу соотношения (26), распространяясь от разрывов под углами $\sim \pm \pi/4$, пересекаются, они выделяют плоскости повышенной подвижности. Система получающихся плоскостей скольжения представляет собой достаточно сложный объект для количественного анализа. Можно сказать, что такая система организует переход от локализованной деформации одиночных полос сдвига, пересекающих весь образец и связанных с разрывами в прочном покрытии, к условиям локализации на образце без покрытия при значительно большей суммарной деформации.

Если принять простейшее предположение, что взаимодействие в группе полос сдвига усиливает некоторую одну полосу до уровня, необходимого для прорастания ее до противоположной стороны образца, при простом суммировании раскрытия трещин в данной группе разрывов на одной стороне, можно записать условие, позволяющее найти число разрывов в группе, необходимое для прорастания полосы сдвига:

$$\Sigma \delta_c = k\delta^*, \quad (28)$$

где δ^* — раскрытие разрыва для одиночного локализованного сдвига; k — коэффициент ($k \sim 1$); δ_i — раскрытие в группе разрывов.

Используя (5) для варианта одиночного сдвига

$$\delta^* \approx \frac{\sigma_y H}{E}, \quad (29)$$

а также (4) при $m = \sqrt{2}$ и (24), получим

$$\frac{\delta^*}{\delta_i} \approx \frac{1}{m^*} \frac{\sigma_y}{\sigma_b} \frac{H}{h} m \sim 5.4. \quad (30)$$

Отношение δ^*/δ_i дает необходимое количество разрывов в группе, обеспечивающей одну сквозную полосу сдвига.

Для рассматриваемых примеров интересно оценить ситуацию для наименьшей толщины упрочненного слоя ($h \sim 20$ мкм). Полагая $\sigma_y \sim \sigma_b/1.3$ при $H \sim 0.9$ мм, по-

лучим $\delta^*/\delta_i \sim 6.4$. Следовательно, на длине порядка $2H \sim 1.8 \div 2$ мм, соответствующей расстоянию между разрывами, приуроченными к последовательности магистральных полос сдвига, должно находиться в сумме $6 \div 7$ разрывов меньшего масштаба. Отсюда максимальный размер расстояний между разрывами будет

$$\Delta\ell \sim \frac{2H}{\delta^*/\delta_i} \approx \frac{2}{6 \div 7} \approx 0.33 \div 0.28 \text{ мм}. \quad (31)$$

Напомним, что согласно данным [5] для $h \sim 20$ мкм размер $\Delta\ell$, соответствующий максимуму распределения для искомой фазы деформирования составляет 0.23 мм.

Таким образом, предположение о суммировании раскрытий разрывов представляется правомерным.

Результаты настоящего анализа можно свести в таблицу (табл. 1) механизмов разрушения по параметру $\frac{\sigma_b h}{\sigma_y H}$.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН № 12 «Структурная механика материалов и элементов конструкций. Взаимодействие нано-, микро-, мезо- и макромасштабов при деформировании и разрушении».

Литература

1. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Структуры в процессах разрушения // Изв. РАН. МТТ. – 1999. – № 5. – С. 49–71.
2. Антипина Н.А., Панин В.Е., Слосман А.И., Овечкин Б.Б. Волны переключения макрополос локализованной деформации при растяжении поверхностно упрочненных образцов // Физ. мезомех. – 2000. – Т. 3. – № 3. – С. 37–41.
3. Панин В.Е. Синергетические принципы физической мезомеханики // Физ. мезомех. – 2000. – Т. 3. – № 6. – С. 5–36.
4. Панин В.Е., Деревягина Л.С., Дерюгин Е.Е., Панин А.В., Панин С.В., Антипина Н.А. Закономерности стадии предразрушения в физической мезомеханике // Физ. мезомех. – 2003. – Т. 6. – № 6. – С. 97–106.
5. Колесова Н.А. Механизмы пластической деформации и разрушения на мезомасштабном уровне поверхностно упрочненной хромистой стали / Дис. ... канд. техн. наук. – Томск: ИФПМ СО РАН, 1998. – 118 с.
6. Александров В.М., Мхитарян С.М. Контактные задачи для тел с тонкими покрытиями и прослойками. – М.: Наука, 1983. – 488 с.
7. Соколовский В.В. Теории пластичности. – М.: Высшая школа, 1969. – 608 с.
8. Хеллан К. Введение в механику разрушения. – М.: Мир, 1988. – 364 с.
9. Панин С.В. Закономерности пластической деформации и разрушения на мезоуровне материалов с покрытиями и поверхностным упрочнением // Физ. мезомех. – 2004. – Т. 7. – Спец. выпуск. – Ч. 1. – С. 109–112.