

05.1

©1994

МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА МИКРОЧАСТИЦ В МЕТАЛЛЕ

А. Э. Герасимов

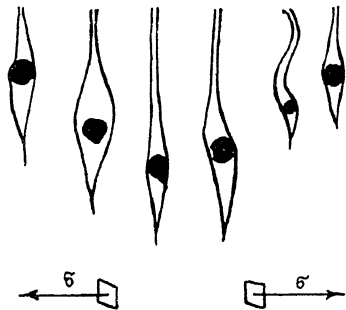
Теоретические модели явления сверхглубокого проникания высокоскоростного потока частиц порошка с размерами до нескольких десятков микрон в различные металлы и сплавы на глубины во многие миллиметры [1-3] не учитывают коллективность явления и необходимость параболической формы проникающего потока.

Лишь небольшая доля частиц (менее 10%) способны проникать на значительные глубины. Большинство частиц тормозится, сталкиваясь с поверхностью мишени или с другими, уже ударившимися частицами.

Исходя из проведенного анализа тонкой структуры материала [4,5] мишени можно утверждать, что энергия пластической деформации всего канала и его окрестностей превышает начальную кинетическую энергию частицы.

Таким образом, известные модели сплошных сред при условиях, близких к нормальным, не способны описать картину сверхглубокого проникания. Удар выпуклого потока частиц формирует криволинейную осесимметричную ударную волну. Следовательно, возникает поле скоростей материальных частиц мишени, имеющее ненулевую радиальную составляющую и растягивающее материал мишени в направлениях, перпендикулярных прониканию.

При динамическом распространении плоских трещин в различных твердых телах всегда возникает зона пластических деформаций вблизи кончика трещины. С возрастанием скорости распространения трещин до 1 и более км/с увеличение температуры в сталях достигает 400-1000° С на поперечном расстоянии порядка 10 микрон от кончика трещины [6], в стекле и кварце более 3000° С на расстоянии около 10-20 ангстрем [7]. Локализация пластических деформаций еще до разрушения и продвижения трещины вперед ведет к диссипации энергии и росту температур, который, в свою очередь, разупрочняет материал, приводя к еще большим пластическим деформациям. Энергия, необходимая для пластических деформаций и образования новых поверхностей, поступает из упруго деформированного объема окружающей среды.



Картина движения осесимметричного потока микрочастиц внутри материала мишени, растянутого в направлениях, перпендикулярных прониканию напряжением σ . Частицы движутся вниз.

Высокая однородность и монотонность геометрических и структурных характеристик вдоль отдельного канала указывает на квазистационарность процесса проникания в системе координат, движущейся с частицей.

Наблюдаемая после сверхглубокого проникания локальная цилиндрическая симметрия микроструктуры канала и его окрестностей приводит к необходимости цилиндрической симметрии картины проникания. Очевидно, что за частицей происходит осесимметричное полное или неполное схлопывание канала. По-видимому, из-за очень большой инерции материала мишени и огромной кривизны частицы срыв обтекания происходит не позднее, чем в сечении, близком к максимальному. Следовательно, материала мишени на передней поверхности проникающей частицы нет. С другой стороны, локальная симметрия структуры образуемого канала и отсутствие больших давлений в полости перед частицей не оставляют других возможностей, как существование конусообразной трещины с нулевым углом раскрытия в вершине. Конечный угол при квазистационарном обтекании невозможен из-за ненулевой скорости на образуемой поверхности. На рисунке показана картина движения потока частиц.

Величины деформаций в районе кончика конусообразной трещины будут выше, чем для плоских трещин, распространяющихся с той же скоростью в том же материале. Само существование конусообразной трещины, в отличие от плоской, приводит к бесконечным деформациям на всей появившейся поверхности ввиду геометрии явления. Так как раскрытие происходит из отрезка прямой, то любая бесконечно малая окружность, охватывающая кривую, приобретает конечный радиус после продвижения трещины. Радиальная деформация будет обратно пропорциональна расстоянию до оси трещины. Вероятно, температура на образуе-

мой поверхности в окрестности вершины (порядка многих микрон), может превышать температуру плавления металла.

Растянутая до критических напряжений среда подвергается локализованному воздействию движущихся впереди вершин трещины полей повышенных растягивающих напряжений и температур, приводящих к пластическим деформациям в радиальных направлениях, адиабатическому росту температур и продвижению вершины. До тех пор пока не произойдет релаксация напряжений, в окружающем упруго деформируемом объеме за счет потерявшей устойчивость микрозоны нормальное напряжение к поверхности полости направлено наружу и полость увеличивается в размерах, преодолевая силу поверхностного натяжения и увеличивая размеры зоны пластических деформаций. Если плотность частиц достаточно велика, то значительная релаксация упругих напряжений за счет образования каналов будет происходить в объеме, соответствующем лишь нескольким диаметрам расширяющейся полости. Далее из-за выпуклости потока сзади движущиеся частицы релаксируют растягивающие напряжения в перпендикулярных плоскостях позади частицы и генерируют сходящиеся волны сжатия, ведущие к смене знака радиальных напряжений. Ввиду инерции материальных частиц среды полость продолжает расширяться с уменьшением скорости. Это расширение приводит к образованию цилиндрической или торообразной зоны повышенного давления вокруг канала. Наибольшие сжимающие напряжения будут вокруг максимального сечения канала, где уже радиальная компонента скорости меняет знак. Затем начинается неполное схлопывание канала с пластическим осесимметричным сжатием прилегающих к каналу слоев. Из-за образуемых дыр в плоскостях, перпендикулярных движению, большие растягивающие напряжения в макрообъеме, где прошел поток частиц, исчезают. Далее релаксация растягивающих напряжений всей мишени из-за прекращения нагрузки на поверхности ведет к появлению экспериментально обнаруженных значительных сжимающих остаточных напряжений вокруг стенок отвердевшего канала.

Интересно, что в предыдущем абзаце нет ни слова о влиянии на раскрытие самой проникающей частицы, которое действительно, судя по глубинам, должно быть очень мало. Вероятно, что если ее размеры достаточно велики (несколько десятков микрон), то она, еще более увеличивая размеры полости, находится под действием силы высокоскоростного трения с расплавленной поверхностью канала, что уменьшает ее скорость и размеры. При небольших размерах частицы (немногие микроны) возможно, что основная ее энер-

гия расходуется на стабилизацию скорости и направления раскрытия трещины. Вполне вероятно, что на некоторых участках частица вообще не касается материала мишени, что косвенно подтверждается отсутствием ее материала на стенках. В случае, если скорость вершины трещины становится меньше скорости частицы, то ее давление на поверхность трещины возрастает и вершина продвинется дальше от частицы.

Список литературы

- [1] Григорян С.С. // ДАН СССР. 1987. Т. 292. В. 6. С. 1319-1323.
- [2] Альтшуллер Л.В., Андилеево С.К., Романов Г.С., Ушеренко С.М. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 5. С. 55-57.
- [3] Буравова С.Н. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 17. С. 63-67.
- [4] Ушеренко С.М., Губенко С.И. // Метал. и терм. обраб. металлов. 1991. В. 2. С. 44-46.
- [5] Ноздрин В.Ф., Ушеренко С.М., Губенко С.И. // ФиХОМ. 1991. В. 6. С. 19-24.
- [6] Zender Alan T., Rosakis Aras J. // J. Mech. Phys. Solids. 1991. V. 39. N 3. P. 385-415.
- [7] Weichert R., Schonert K. // J. Mech. Phys. Solids. 1978. V. 26. N 3. P. 151-161.

Поступило в Редакцию
14 сентября 1993 г.