

05;12

О возможном механизме "сверхглубокого проникания" микрочастиц в твердую преграду

© А.А. Сивков

НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете
E-mail: admin@admin.hvri.tpu.tdu.ru

Поступило в Редакцию 19 марта 2001 г.

На основе полученных автором экспериментальных данных показана возможность реализации сверхглубокого проникания по классическому кумулятивному механизму, что ранее никем не рассматривалось.

В экспериментах по нанесению композиционного покрытия состава титан+карбид титана ($Ti + TiC$) на стальную подложку с помощью коаксиального магнитоплазменного ускорителя [1,2] получен эффект, аналогичный так называемому "сверхглубокому прониканию" микрочастиц [3–6]. Состав композиционного материала формировался в процессе работы ускорителя за счет плазменно-эрозионной наработки титана с поверхности титановых электродов и динамического синтеза карбида титана, углерод для которого закладывается в виде графитового порошка в зону инициирования дугового разряда. При диаметре цилиндрического ускорительного канала 13 mm и длине ствола 280 mm головная часть плазменной структуры сильноточного разряда типа Z-пинч ускорялась нарастающим до 150 kA током за время 170 μs до скорости ~ 3.3 km/s. Стальная мишень-подложка толщиной 10 mm и диаметром 120 mm устанавливалась на расстоянии 400 mm от среза ствола. Эксперименты проводились в атмосферных условиях. На поверхности стальной подложки получено композиционное покрытие толщиной до 1.0 mm состава $Ti + TiC$ в соотношении 1 : 2, согласно результатам рентгенофазового анализа (дифрактометр ДРОН-3,0, $Cu_k(\alpha)$ -излучение). На рис. 1 представлена микрофотография, полученная на растровом электронном микроскопе Jeol-840, нетравленного шлифа вертикального среза стального образца с покрытием. В работах [3–6] утверждается, что аномальный эффект сверхглубокого проникания возможен лишь

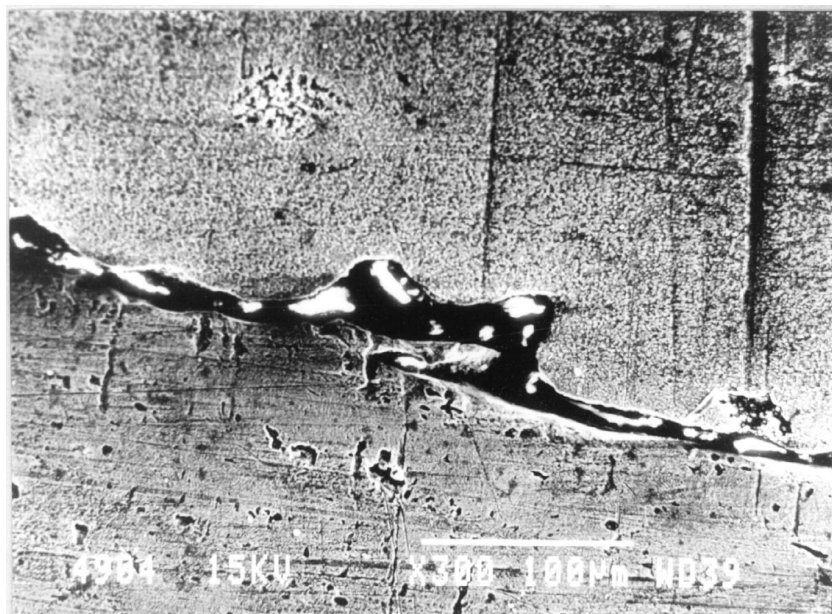


Рис. 1. Растровая микрофотография нетравленого шлифа вертикального среза стального образца (нижняя область) с композиционным покрытием Ti + TiC (верхняя область). Увеличение $\times 200$.

в некотором узком диапазоне условий взрывного метания и размеров частиц $10 \div 100 \mu\text{m}$. При сравнимых скоростях встречи потока, созданного электромагнитным ускорителем, со стальной подложкой на шлифе ее вертикального среза (рис. 1) наблюдаются многочисленные треки с поперечным размером менее $10 \mu\text{m}$. Размер проникающих частиц может быть порядка $1 \div 5 \mu\text{m}$. Прямолинейность треков сохраняется на глубину до $\sim 50 \mu\text{m}$ (рис. 1), а далее их траектории становятся извилистыми и на фотографии видны лишь фрагменты, пересечения с плоскостью среза, которые укладываются в "дорожки" и обнаруживаются на глубине до $\sim 350 \mu\text{m}$. На такой же глубине установлено присутствие титана методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (приставка Link к микроскопу Joel-840). Косвенное подтверждение сверхглубокому прониканию получено при исследовании микротвердости стали на том

же срезы подложки, которая в поверхностном слое глубиной до 350 нм в среднем равна 2100 МПа, что примерно на 25% выше средней величины микротвердости нижележащих слоев. Таким образом, наблюдаемая глубина проникания частиц материала потока на два порядка больше их предполагаемых размеров, что дает основание для отнесения наблюдаемого эффекта к "сверхглубокому прониканию". Полученные в работе результаты согласуются с известными в основном условиями возникновения эффекта: необходимо воздействие на подложку высокоскоростного (~ 2.0 км/с), высокоплотного (более 1.0 г/см³) и длительного (порядка 10^{-4} с) потока. Однако в рассматриваемых условиях полного схлопывания треков не наблюдается, а имеет место лишь затягивание их входных отверстий и некоторое увеличение поперечного размера с заглаблением. Кроме того, в отдельных случаях можно заметить разветвление треков. Следует отметить, что на фотографии рис. 1 средняя темная зона, вероятно, является сколом твердой и хрупкой композиции Ti + TiC. Избежать этого методического дефекта удалось при более тщательном приготовлении шлифа. Тот же образец был повторно отшлифован, отполирован и протравлен 5%-м раствором HNO₃ + C₂H₅OH. Электронно-скопическое исследование вновь полученного шлифа дало новые интересные результаты: по всей сохраненной границе покрытие-подложка обнаружены достаточно равномерно расположенные зубцеобразные дефекты. На фотографии (рис. 2) представлены их изображения при 6500-кратном увеличении. Несомненно, что на фотографии зафиксированы незавершенные кумулятивные процессы. Отчетливо видны недосхлопнувшиеся кумулятивные выемки с затвердевшими остатками кумулятивных струй и, напротив, каверны или входные отверстия их внедрения. В правой части фотографии (рис. 2) можно отследить темную траекторию глубокого внедрения струи. Геометрия зафиксированных фрагментов полностью соответствует классическим представлениям теории кумуляции [7]. Объяснение возникновения кумулятивных эффектов оказывается совершенно естественным и даже очевидным. Фронт набегающего на поверхность подложки потока не является и не может быть абсолютно плоским. Он имеет свой рельеф, состоящий из выпуклостей и впадин-выемок. Когда такая впадина подходит к плоской поверхности преграды и опирается на нее своими кромками, то возникает классическая конфигурация кумулятивной системы. Схлопывание впадины-выемки и формирование кумулятивной струи из материала поверхностного слоя стенки выемки обеспечивается набеганием на нее

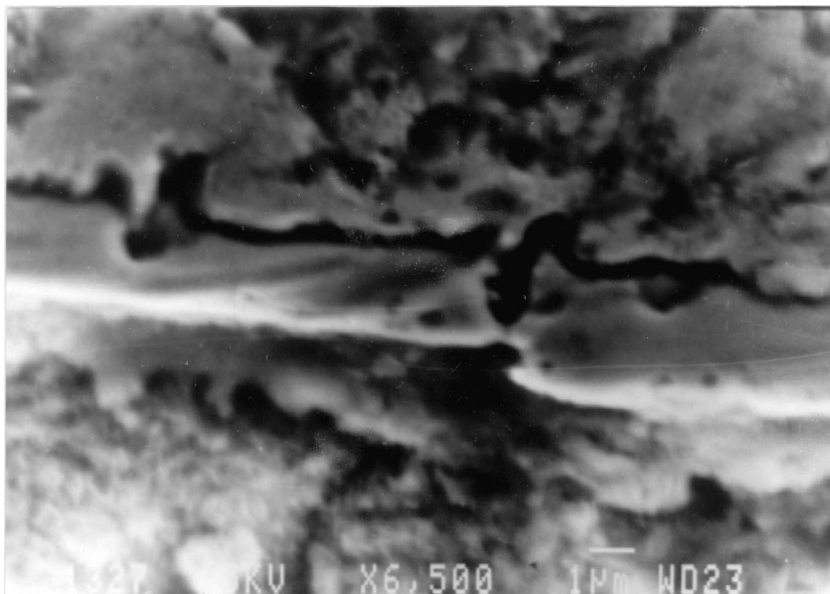


Рис. 2. Микрофотография травленого шлифа при увеличении $\times 6500$ с зафиксированными в застывшем покрытии недозавершенными кумулятивными процессами.

вещества с массовой скоростью, близкой к скорости потока. Плотность вещества в кумулятивной струе и ее скорость значительно превышают параметры в исходном потоке. В соответствии с гидродинамической теорией [7] глубина проникновения струи L в преграду определяется формулой Лаврентьева:

$$L = l\sqrt{\rho_1/\rho_2}, \quad (1)$$

где l — эффективная длина кумулятивной струи; ρ_1 и ρ_2 — соответственно плотности материалов струи и преграды.

Длина струи может до 3 раз превышать длину образующей кумулятивной выемки. Элементарная оценка по гидродинамической модели показывает, что проникание струи по прямолинейной траектории на глубину $\sim 50 \mu\text{m}$ возможно при диаметре основания полусферической выемки $20 \div 30 \mu\text{m}$ и поперечном размере струи порядка $1 \mu\text{m}$.

Дальнейшее проникание по криволинейной траектории на глубину до $\sim 350 \mu\text{m}$ может быть объяснено с учетом упругого взаимодействия, движением струи по опережающим микротрещинам и межзеренным границам микроструктуры стали. Возможность такого механизма проникания твердых частиц обоснована в [8,9] и подтверждается результатами данной работы — наблюдаемым сильным изменением микроструктуры стали, выраженным в дроблении зерен и разрыве границ между ними, до глубины $\sim 350 \mu\text{m}$.

Проявление кумулятивного механизма проникания возможно и при организации высокоскоростного и плотного потока твердых микро-частиц с помощью взрывных кумулятивных ускорителей, используемых в экспериментах в [3–6]. Важным аргументом в пользу этого предположения следует считать результаты численного расчета параметров потока частиц, приведенные в [10], согласно которым геометрическое очертание фронтальной части области потока с максимальной плотностью ($\sim 4.0 \text{ g/m}^3$) имеет форму кумулятивной выемки.

Высказанное в настоящей работе предположение основано на экспериментальных наблюдениях, однако требует проведения дополнительных исследований.

Автор выражает благодарность сотруднику НИИ ВН д.ф.-м.н. А.П. Ильину и сотрудникам ФНПЦ "Алтай" к.т.н. А.М. Громову и инж. Н.В. Бычину за оказанную помощь и полезное обсуждение.

Работа выполнена в рамках проекта "Разработка научно-технических основ динамического синтеза сверхтвердых материалов и получения покрытий на их основе". Программы Минобразования РФ "Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники".

Список литературы

- [1] Патент № 2150652 РФ. Коаксиальный ускоритель Сивкова. Сивков А.А. 7F41B6/00. Оpubл. 10.06.2000. Бюл. № 16.
- [2] Сивков А.А. // ПМТФ. 2001. Т. 42. № 1. С. 3–12.
- [3] Козорезов К.И., Максименко В.Н., Ушеренко С.М. // Избранные вопросы современной механики. М.: Изд-во МГУ, 1981. Ч. 1. С. 114–119.
- [4] Козорезов А.К., Козорезов К.И., Миркин Л.И. // ФХОМ. 1990. № 2. С. 51–55.

- [5] Козорезов К.И., Миркин Л.И. // Там же. 1999. № 3. С. 75–78.
- [6] Козорезов К.И., Миркин Л.И. // Там же. 2000. № 1. С. 77–80.
- [7] Физика взрыва / Под ред. К.П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
- [8] Григорян С.С. // ДАН СССР. 1987. Т. 292. № 6. С. 1319–1323.
- [9] Черный Г.Г. // Там же. С. 1324–1328.
- [10] Андиловко С.К., Романов Г.С., Ушеренко С.М. // ИФЖ. 1991. Т. 61. № 1. С. 46–51.