

9. Б а б е н к о С. П. Математическая модель ингаляционного поступления токсичных веществ с продуктами гидролиза гексафторида урана в условиях повседневной производственной деятельности // Энергосбережение и водоподготовка. – 2005. – № 5. – С. 76–77.
10. П р е д е л ы поступления радионуклидов для работающих с ионизирующим излучением: Публикация 30 МКРЗ. Ч.1 / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат. – 1982. – 136 с.
11. Б а б е н к о С. П., Б а д ь и н А. В. Методы определения функции распределения радиуса аэрозольных частиц уранилфторида // Атомная энергия. – 2005. – 99, № 5. – С. 353–358.

Статья поступила в редакцию 21.05.2007

Светлана Петровна Бабенко родилась в 1937 г., окончила в 1960 г. Московский государственный педагогический институт им. В.И. Ленина. Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 65 научных работ.

S.P. Babenko (b. 1937) graduated from the Lenin Moscow State Pedagogical Institute in 1960. Ph. D. (Phys.-Math.), assoc. professor of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 65 publications.

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 548.5.01

В. И. К о ш к и н

### УСКОРЕННАЯ МИГРАЦИЯ ЛЕГКОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ ПО ПОЛОСАМ АДИАБАТИЧЕСКОГО СДВИГА

*Рассмотрены вопросы твердожидкофазного взаимодействия металлических веществ в условиях импульсного воздействия на зону их контакта. Показано, что при воздействии электрического и ударно-волнового импульса наблюдается ускоренная миграция легкоплавких элементов в объем твердых металлов на расстояния до нескольких миллиметров без нарушения сплошности металла матрицы. Сделано предположение о том, что наблюдаемая миграция жидких металлов происходит по полосам адиабатического сдвига, возникающим в результате действия энергетического импульса одновременно с расплавлением легкоплавких металлов.*

Изучению полос адиабатического сдвига (далее ПАС) в последние десятилетия уделяется довольно большое внимание. Среди относительно новых фундаментальных работ можно назвать монографию [1], в которой наряду с детальным описанием феноменологии процесса образования и особенностей микроструктуры ПАС значительное внимание уделено математическому описанию этого явления.

Хорошо известно, что понимание природы процесса формирования ПАС очень важно для прогнозирования поведения различных материалов при высокоскоростном нагружении. В проведенных исследованиях это явление использовано для объяснения наблюдаемого в ряде экспериментов аномально быстрого (доли секунды) проникания тяжелых легкоплавких элементов

в объем твердых тугоплавких металлов и сплавов (например, проникание свинца, олова и меди в объем стали) на расстояния до нескольких миллиметров [2].

Указанные эффекты наблюдались при разработке методов электроимпульсного и ударно-волнового поверхностного легирования тугоплавких металлов и сплавов тяжелыми легкоплавкими металлами.

Поверхностное легирование тяжелыми легкоплавкими элементами конструкционных сталей резко снижает коэффициент трения, повышает их износостойкость, не ухудшая механических свойств в целом. Поэтому разработка металлосберегающих экологических методов поверхностного легирования конструкционных материалов является актуальной задачей. Обнаруженные при этом закономерности взаимодействия легкоплавких элементов с тугоплавкими при воздействии на зону их контакта концентрированных потоков энергии в виде ударно-волнового или электрического импульса могут существенно расширить имеющиеся представления о взаимодействии жидких металлов с твердыми. На этой основе могут быть разработаны нетрадиционные подходы к созданию новых композиционных материалов специального назначения. В теоретическом плане обнаруженные закономерности дают возможность получения новой полезной информации о природе и особенностях ПАС.

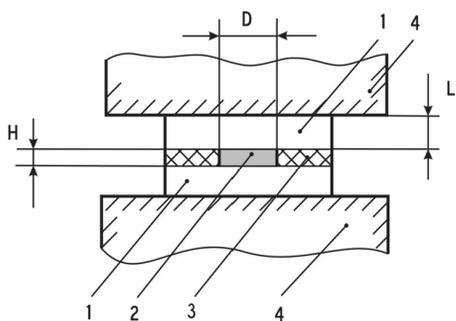
Воздействие электрического импульса на контактное взаимодействие легкоплавких и тугоплавких металлов изучали с помощью специально разработанной установки. Схема сборки образца показана на рис. 1. Между двумя стальными пластинами толщиной 5 мм помещали тонкий (не более 1 мм) слой свинца или медно-свинцового сплава монотектического состава. Через такую сборку пропускали несколько электрических импульсов длительностью 10 мс и плотностью тока  $\approx 10^3$  А/см<sup>2</sup>.

На рис. 2 показана микроструктура стали после пропуска электрического импульса. Хорошо видно, что легкоплавкий реагент под воздействием электрического импульса расплавился (зона оплавления сплава) и вступил в обратную монотектическую реакцию с прилегающим железом

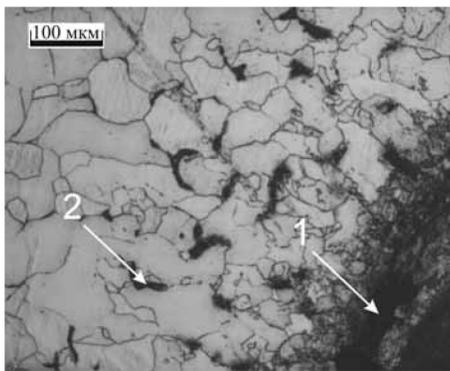


где  $L_m$  — жидкость монотектического состава. Об этом говорит большое количество железа в зоне оплавления, легко выявляемое металлографически и с помощью рентгеновского микроанализатора. Факт реакционного расплавления части железа говорит о том, что температура в зоне контакта была не менее 1500 °С.

Давление в зоне реализации обратной монотектической реакции составляло около 1000 атм. Это означает, что стальные пластины были подвергнуты импульсному воздействию, способному вызвать значительные деформации. По нашему мнению, наблюдаемая после импульсного воздействия микроструктура участков стали, не претерпевших монотектического оплавления, доказывает это предположение, и в частности то, что деформация стали сопровождалась образованием в ней ПАС. Речь идет о хорошо различимых протяженных каналах, содержащих строчечные включения свинца (а в случае медно-свинцового сплава также и меди). Объяснить столь глубокое проникание свинца и меди в объем стали без привлечения представлений о формировании под воздействием импульсных напряжений ПАС и интенсивной миграции по ним расплавов тяжелых металлов не представляется воз-



**Рис. 1. Схематическое изображение зоны контакта металлов, на которую действуют электрические импульсы:** 1 — целнометаллические пластины; 2 — образец; 3 — изолятор; 4 — медные контакты



**Рис. 2. Микроструктура стали с включениями свинца, сопряженная с зоной монотектического оплавления:** 1 — зона монотектического оплавления; 2 — включения свинца

возможным. Напротив, предположение о том, что именно ПАС обеспечивают проникание жидких металлов в объем твердых, является вполне логичным.

Так, согласно работе [1] и другим работам, в которых рассмотрено это явление, в ПАС развиваются температуры до  $10^5$  °С и миграция в эти зоны расплавов тяжелых металлов является оправданной с термодинамической точки зрения. Кроме того, согласно многочисленным экспериментальным данным ПАС могут иметь самую разнообразную форму и наблюдаемая нами геометрия распространения свинца и меди согласуется с описанными в литературе результатами.

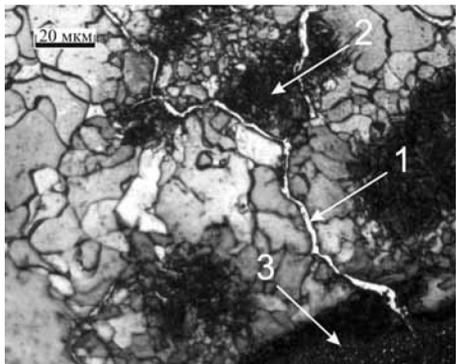
Таким образом, электрический импульс приводит одновременно к образованию жидкости монотектического состава и расходящихся двумерных ПАС, “канализующих” расплав вглубь твердой стали. Плоскость шлифа, пересекая двумерные ПАС, создает впечатление их одномерности.

На рис. 3 показан еще один пример глубокого проникания меди и свинца в объем стали и ПАС, по которому эти компоненты мигрировали в объем.

Не менее интересен случай миграции легкоплавкого элемента в объем стали в результате образования ПАС при ударно-волновом воздействии на зону контакта пластин стали и свинца (рис. 4), рассмотренный в работе [3] с позиции мезомеханики. На шлифе, рассекающем перпендикулярно стальной темплет, в характеристическом излучении свинца хорошо видны несколько параллельных ПАС внутри зерна, заполненных свинцом, а также зернограничные зоны неустойчивости (ПАС), заполненные свинцом.

Возвращаясь к модели процесса, можно предложить следующее объяснение наблюдаемым явлениям: инициирование ударной волны и ее взаимодействие со свинцом и железом привело к двум одновременно протекающим процессам — расплавлению свинца и его нагреву (по расчетам, на 900...1000 °С) и образованию в железе зон локальной неустойчивости кристаллической решетки (ПАС). Поскольку в них, как отмечалось ранее, в течение долей секунды локальная температура может достигать нескольких тысяч градусов, то реализуются условия для протекания обратного монотектического превращения, результатом которого является интенсивная миграция свинца в глубь железного образца.

**Выводы.** Полосы адиабатического скольжения, возникающие в материале в результате высокоскоростного деформирования, в случае их контакта



**Рис. 3. Микроструктура стали с включениями меди и свинца, сопряженная с зоной монотектического оплавления:**

1 — включения свинца; 2 — включения меди; 3 — зона монотектического оплавления

с расплавом легкоплавкого металла или сплава при определенных условиях могут служить каналами, по которым происходит быстрое протекание расплава в глубь твердого металла или сплава. После прохождения расплава сплошность материала не нарушается. Наблюдаемое явление может дать дополнительную информацию о природе ПАС и служить основой разработки новых методов поверхностного легирования конструкционных материалов тяжелыми легкоплавкими элементами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W r i g h t T. W. The physics and mechanics of adiabatic shear bands. – Cambridge University Press, 2002. – 241 pp.
2. Я в л е н и е взаимного массопереноса контактирующих твердых металлических веществ при импульсном воздействии / Ю.С. Авраамов, Н.П. Калашников, В.И. Кошкин, В.Е. Панин, К.Н. Шамшеев, А.Д. Шляпин. Международная академия авторов научных открытий и изобретений. Открытие, диплом № 322, 01.12.2006.
3. Ф и з и ч е с к а я мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. Явление взаимного проникания частиц разнородных твердых тел без нарушения сплошности под воздействием концентрированных потоков энергии / В.Е. Панин, А.В. Панин, Д.Д. Моисеенко, А.Д. Шляпин, Ю.С. Авраамов, В.И. Кошкин // Физическая мезомеханика. – 2006. – № 94. – С. 5–13.

Статья поступила в редакцию 20.05.2008

Валерий Иванович Кошкин родился в 1963 г., в 1991 г. окончил Московский инженерно-физический институт. Канд. техн. наук, проректор Московского государственного индустриального университета. Автор 45 научных работ, в том числе одной монографии.

V.I. Koshkin (b. 1963) graduated from the Moscow Institute for Engineering and Physics in 1991. Ph. D. (Eng.), vice-rector of the Moscow State Industrial University. Author of 45 publications including a monograph.

