



УДК 534.2
DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-24-31

Поступила 02.11.2018
Received 02.11.2018

НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И ПЕРЕСТРОЙКИ СТРУКТУРЫ ЛИТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Е. И. МАРУКОВИЧ, Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11. E-mail: info@itm.by,
С. М. УШЕРЕНКО, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: usherenko@gmail.com,
Ю. С. УШЕРЕНКО, Филиал БНТУ «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики БНТУ», E-mail: osher_yu@mail.ru

Рассмотрены возможности создания композиционных материалов с применением метода сверхглубокого проникновения (СГП). При прошивке металлов и сплавов в режиме сверхглубокого проникновения порошковые частицы проникают на глубины в десятки и сотни миллиметров. Приведены структуры, доказывающие, что при движении в металлической матрице (в закрытой системе) порошковые частицы генерируют дополнительную энергию. Кроме того, формируются волокна (каналы), легированные вводимым порошками веществом и синтезированными материалами. Показано, что легирование в режиме СГП локализовано в армирующих зонах и происходит за счет внедрения материала микрочастиц и синтеза в зонах высокого давления.

Ключевые слова. Соударение сгустков микрочастиц с металлами, сверхглубокое проникание, большие затраты энергии, микровзрывы в металле, термоядерный синтез химических элементов.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Новые перспективы дополнительного легирования и перестройки структуры литых металлических материалов / Е. И. Марукович, С. М. Ушеренко, Ю. С. Ушеренко // *Литье и металлургия*. 2018. № 4. С. 24–31. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-24-31.

NEW PERSPECTIVES OF ADDITIONAL DOPING AND RESTRUCTURING OF CAST METAL MATERIALS

E. I. MARUKOVICH, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus, 11, Bialynitskogo-Biruli str. E-mail: info@itm.by,
S. M. USHERENKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: usherenko@gmail.com,
YU. S. USHERENKO, Branch of the BNTU «Institute of improvement of professional skills and staff retraining on new directions of engineering, technology and economy», Minsk, Belarus, E-mail: osher_yu@mail.ru

Possibilities of creation of composites with application of a method of super-deep penetration (SDP) are considered. At drifting of metals and alloys in a regime of super-deep penetration powdered particles penetrate to depths into tens and hundreds millimetres. Results are brought, that at driving in a metal lower die (in the enclosed system) powdered particles generate additional energy. The filaments (channels) doped by substance introduced by powders and synthesised materials are besides, shaped. It is shown, that doping in regime SDP is localised in reinforcing zones and occurs at the expense of a heading of a material of microparticles and synthesis in high pressure zones.

Keywords. The collision of bunches of microparticles with metals, Super-deep penetrations, the big energy consumptions, microexplosions in metal, a nuclear fusion of chemical elements.

For citation. Marukovich E. I., Usherenko S. M., Usherenko Yu. S. New perspectives of additional doping and restructuring of cast metal materials. *Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 4, pp. 24–31. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-24-31.

Введение

Традиционно изменение свойств металлов и сплавов производится за счет легирования, изменения структуры и последующей термической обработки. Все эти операции требуют значительных затрат энергии, а соответственно повышения себестоимости конечной продукции.

Относительно новым вариантом технологии, позволяющим одновременно проводить дополнительное легирование и перестройку массива исходного металлического материала, является обработка в режиме сверхглубокого проникания (СГП). Такая обработка – внедрение сгустков микрочастиц на глубины в десятки и сотни миллиметров длительное время рассматривалась как чисто научная проблема [1].

К середине XX в. было установлено, что практически при любых условиях удара глубина кратера при внедрении ударников разного размера (пробоины) не превышает 6 калибров ударника. Отношение глубины кратера к определяющему размеру ударника (калибр) было принято за универсальный критерий оценки удара. Таким образом, не вполне осознанно было признано, что существует физический барьер (ограничение) при ударе. Многочисленные исследования, проводившиеся в различных странах по пробиванию преград и динамическому легированию, позволяли решать задачи увеличения относительной глубины проникновения только в этих пределах [2].

В результате длительного периода исследований экспериментальные результаты, выходящие за этот барьер, просто называли аномальными. Созданные за последние два столетия теоретические модели удара не могут объяснить эти результаты. К аномальным результатам относятся как к артефактам (чудесам). Тем не менее, информации об аномалиях, относительных глубинах проникновения ≤ 100 калибров, начиная с XX в., в публикациях становится все больше. В основном необычные экспериментальные результаты – глубины динамического массопереноса ≥ 100 калибров, необъяснимые с точки зрения механических и гидродинамических моделей, скрывают. Например, удалось изготовить стальные толстые плиты с шариками ртути внутри (диаметром в миллиметры) [3]. Длительное время существовала проблема воспроизводимости этих аномальных результатов. В условиях планеты не были известны естественные процессы, приводящие к таким аномалиям массопереноса.

При уменьшении статической прочности материала преграды сопротивление движению ударника в преграде резко снижается и значительно увеличивается относительная глубина проникновения ударников. Известно, что при выстреле пуль в песок можно получить глубины пробивания в десятки калибров. Если же стрелять в воду, а это используется при экспертизе оружия, то максимальная глубина проникновения может достигнуть 100 калибров.

Все так называемые аномальные результаты получены в области взаимодействия с микрообъектами. Особое внимание концентрировалось на том, что экспериментально установленный барьер относительной глубины образования кратеров объясняется существованием известных постоянных по массе- и теплопереносу для материала преграды. Поэтому увеличение скорости соударения, удельного веса материала ударника и угла удара не должно привести к увеличению относительной глубины кратерообразования. Все эти параметры удара меняют величину кинетической энергии. Однако излишки энергии не могут (в открытой системе) аккумулироваться материалом преграды. Увеличение энергии удара приводит к увеличению скоростей обратного выброса материалов ударника и преграды, плавлению стенок и дна кратера, а также к интенсивному излучению. В широко известном варианте взаимодействий при ударе, который принято называть «макроударом», нет возможности реализовать явление аномального и сверхглубокого проникания (СГП). Излишки энергии тем или иным образом будут удалены из открытой системы тел. Известно, что предельная величина плотности энергии при макроударе в поверхность не превышает 10^9 Дж/м³ [4].

В естественных условиях процесс СГП может наблюдаться в стратосфере и открытом космосе, так как там перемещаются высокоскоростные сгустки космической пыли (тысячи – десятки тысяч метров в секунду), при соударении с которыми может быть реализован весь диапазон необходимых условий. Основной причиной, которая мешала обнаружить СГП на космических станциях, являлось отсутствие сквозных отверстий и соответственно отсутствие разгерметизации модуля с аппаратурой и людьми. В настоящее время можно утверждать, что в условиях реализации СГП существующая защита космических модулей не эффективна. По-видимому, из-за этого на действующих космических станциях возникла проблема с устойчивостью работы компьютерных элементов и систем управления. Эти же новые факторы представляют дополнительную опасность при перемещениях модулей с аппаратурой и людьми через области космоса с высокой концентрацией пылевых объектов [5, 6].

В ходе экспериментальных исследований зафиксирован комплекс условий, в рамках которых проникновение на относительные глубины в 100–10 000 калибров стабильно реализуется [7, 8]. После получения доказательств, что явление сверхглубокого проникания существует возникла потребность определить области практического использования соответствующих эффектов. Основное внимание необходи-

мо сконцентрировать на поиске возможностей практического применения этого вида динамического воздействия.

Целью настоящей работы является определение областей практического использования явления «сверхглубокого проникания», позволяющего создать новые технологические подходы.

Затраты энергии на изменение материала металлической заготовки. Рассматриваются геометрические и структурные изменения, которые регистрируются в металлической преграде при соударении со сгустком высокоскоростных дискретных частиц. В качестве материалов преград были взяты цилиндрические образцы диаметром 50 мм и высотой 100 мм из стали 40, меди и алюминия. Эти материалы хорошо изучены в условиях макроудара, что позволяет использовать известную информацию для оценки регистрируемых макроизменений в преградах. Динамическую обработку модельных образцов проводили по стандартной схеме нагружения [8]. В качестве материала ударников использовали микрочастицы порошка SiC фракции 63–100 мкм. К рассматриваемым макроизменениям цилиндрической преграды относятся образование макрократера на передней части преграды и осадка образца. В качестве микроизменений рассмотрены формирование системы каналов, регистрируемой экспериментально, а также двойникование и изменение геометрии зерен.

В данной работе не учитывали затраты энергии на электромагнитное излучение при СГП, разгон металлической заготовки, а также на выброс микроструй со свободной поверхности преграды [9].

Оценка кинетической энергии ударной волны и сгустка высокоскоростных микрочастиц. При расчете количества энергии, получаемой металлической преградой в результате ударно-волнового нагружения высокоскоростным потоком микрочастиц, использовали следующие значения параметров: массу метаемого материала (m_1) 0,1 кг; массу заряда взрывчатого вещества (m_2) 0,2 кг; скорость потока микрочастиц 1000 м/с. В этом случае величина кинетической энергии метаемого материала составляет $1,5 \cdot 10^5$ Дж.

Макроизменения. Формирование макрократера. Характерным дефектом, наблюдаемым при ударе, является каверна-кратер. При прочих равных условиях соударения объем кратера зависит от удельного веса материала преграды, его пластичности и прочности [3]. В выбранном диапазоне режимов воздействия сгустком частиц карбида кремния получены результаты, приведенные в табл. 1. Расчет энергии кратерообразования проводили на основании экспериментальных результатов для удельной энергии кратерообразования [9]. Наибольший объем кратера и наибольшие затраты энергии на формирование кратеров зарегистрированы в алюминиевой преграде, а наименьшие – в стальной.

Осадка металлической преграды. Воздействие сгустком микрочастиц приводит к уменьшению высоты заготовки и увеличению среднего диаметра. Пластической деформации подвергается весь объем преграды [9]. Таким образом, в нем возникают напряжения, равные или превышающие предел текучести материала преграды.

Для определения истинного напряжения при осадке использовали данные, приведенные в табл. 1, 2.

Т а б л и ц а 1. Оценка энергии кратерообразования

Материал преграды	$K \cdot 10^9, \text{ Дж/м}^3$	$V_c \cdot 10^{-6}, \text{ м}^3$	$E_k, \text{ Дж}$
Сталь 40	2,6	0,98	2548
Медь	2,0	7,0	14000
Алюминий	2,3	20,0	46000

Т а б л и ц а 2. Оценка затрат энергии на осадку металлических преград

Материал преграды	$V_B \cdot 10^{-2}, \text{ м}^3$	$F_B \cdot 10^{-2}, \text{ м}^2$	$F_C \cdot 10^{-2}, \text{ м}^2$	ϕ	ϵ	$\sigma_{0,2} \cdot 10^7, \text{ Дж/м}^3$	$\tau \cdot 10^7, \text{ Дж/м}^3$	$E_d, \text{ Дж}$
Алюминий	2,131	1,133	1,36	0,2	0,1667	5,63	4,690	9 997
Медь	2,131	1,133	1,17	0,0318	0,0328	6,85	6,632	14886
Сталь 40	1,962	1,962	2,13	0,0249	0,0256	21	20, 475	401821

Результаты оценки затрат энергии при осадке преград из стали 40, алюминия и меди приведены в табл. 2. Затраты энергии на осадку преграды из стали в 40 раз выше, чем аналогичные затраты для алюминиевой преграды, и в 26 раз выше, чем для медной.

Формирование элементов канальной структуры при СГП. При оценке затрат энергии на формирование зоны с канальной микроструктурой использовали стандартные для такого рода задач допущения:

- а) статическое сопротивление материала преграды равно нулю;
- б) скорость перемещения стенок каналов равна скорости движения единичного микроударника.

В результате формирования микрозон с канальной структурой энергия затрачивается на раскрытие каналов в направлении, перпендикулярном оси движения микроударников, и на их схлопывание после прохождения частиц. Скорость схлопывания каналов будет превышать скорость проникания микроударника более чем в 3 раза [9]. Массу материала преграды, перемещаемую при раскрытии и схлопывании канала, принимаем равной массе цилиндра, который выделен в преграде. Диаметр цилиндра равен $66 \cdot 10^{-6}$ м (поперечное сечение ударника), а его длина составляет 0,1 м. Величина массы материала преграды, которая перемещается в динамическом режиме, в этом случае будет также занижена, поскольку предполагается деформирование без вовлечения в процесс схлопывания близлежащих слоев. Суммарную затрачиваемую энергию определяли как

$$E_{\Sigma} = E_n N.$$

Расчет количества энергии, необходимой для раскрытия и схлопывания единичного канала, проводили на основании принятых допущений [8]. В этом случае энергия, затрачиваемая на раскрытие канала, составляет для стали 40 0,11 Дж, для меди – 0,12, для алюминия – 0,07 Дж.

Суммарная энергия раскрытия каналов: для стали 40 – $2,25 \cdot 10^4$ Дж, для меди – $1,586 \cdot 10^4$, для алюминия – $6,503 \cdot 10^4$ Дж. Затраты энергии на схлопывание единичного канала: для стали 40 – 1,69 Дж, для меди – 2,38, для алюминия – 0,26 Дж.

Полная энергия схлопывания каналов: для стали 40 – $93,7 \cdot 10^4$ Дж, для меди – $31,5 \cdot 10^4$, для алюминия – $24,1 \cdot 10^4$ Дж.

Оценка количества энергии, затрачиваемой на изменение геометрии зерен. Поскольку энергия, затрачиваемая на двойникование, изменение геометрии и размеров зерен, составляет порядка 5% от энергии ударной волны, общая энергия, затраченная на эти микроструктурные изменения, составит не менее $5 \cdot 10^3$ Дж.

Баланс энергии. Сопоставление вводимой и затрачиваемой энергии проведем с учетом рассчитанных выше величин:

$$E_p \neq E_k + E_d + E_{op} + E_{com} + E_{ex}.$$

Затраты энергии при реализации динамического нагружения составляют:

$$E_a = E_k + E_d + E_{op} + E_{com} + E_{ex}.$$

Таким образом, для меди $E_a \approx 364$ кДж; для стали 40 – 1368; для алюминия – ≈ 367 кДж. Поскольку кинетическая энергия сгустка дискретных частиц составляет $1,5 \cdot 10^5$ Дж, наблюдаем дисбаланс затрачиваемой и потребляемой энергии в 2–9 раз.

При оценке был принят подход занижения затрат энергии при динамическом нагружении и завышения количества энергии, вводимой в материал сгустком высокоскоростных микрочастиц, а возможные в данной оценке ошибки не могут быть значительными. Вероятным представляется существование дополнительного источника энергии при реализации СГП, что позволяет обеспечить соблюдение баланса энергии:

$$E_p + E_{unc} = E_a.$$

Определение источника дополнительной энергии. Поскольку процессы макроудара и перестройки структуры при ударе достаточно хорошо изучены, нет оснований предполагать возможность выделения при макроударе дополнительной энергии. Наиболее перспективным с этой точки зрения является процесс СГП.

В ходе исследований установлено, что СГП сопровождается схлопыванием микрополостей. После прохождения ударника формируется микрополость, которая схлопывается за счет высокого давления в зоне, окружающей канал. В работе [9] приведены оценки удельной энергии в зависимости от конечного диаметра канальной зоны после прохождения ударника. Некоторые результаты этих оценок приведены в табл. 3.

Таблица 3. Изменение времени захлопывания канала и плотности энергии после проникания ударника в зависимости от конечного диаметра канальной зоны

d , мкм	$\tau_c \cdot 10^{-8}$, с	σ_{sdp} , Дж/м ³
2	4,92	$0,776 \cdot 10^{14}$
0,42	5,05	$8,246 \cdot 10^{15}$

Из таблицы видно, что в период времени $\approx 10^{-8}$ с возможна реализация уровня давлений в микрообъеме свыше 10^{15} Н/м².

Так как максимальный диаметр канальной зоны не превышает максимального диаметра микроударника, то его величина составляет 80–100 мкм. Диаметр металлической цилиндрической преграды – 30–50 мм. С учетом этого процесс схлопывания можно считать происходящим в металлической камере, толщина стенок которой на шесть порядков превышает размер канальной зоны. Ввиду малого времени процесса динамической кумуляции (табл. 3) отвод энергии из микрообъема затруднен. В режиме реального времени выброс энергии из точки схлопывания может быть только за счет излучения. При исследовании сверхглубокого проникания частиц порошка в металлический образец с помощью пленочных датчиков зарегистрированы треки, оставленные элементарными частицами, энергия которых составляет сотни мегаэлектрон-вольт.

Внедрение в режиме СГП сгустков микрочастиц в металлические преграды на глубины в десятки и сотни миллиметров на основании классических представлений требует огромных затрат энергии. Затраты энергии динамических проколов сгустка в диаметр сечения (десятки миллиметров) металлической преграды, как минимум, составят десятки мегаджоулей. Масса обрабатываемого металлического материала заготовки 0,1–1,2 кг. При этом максимальные затраты энергии на разгон сгустков порошков массой 0,06–0,12 кг, который осуществляется пушечными и взрывными ускорителями, не превышают 50–150 кДж.

Особенности проникания микрочастиц в объем металлического тела. В процессе сверхглубокого проникания сгустки, состоящие из миллионов микрочастиц порошка, движутся в объеме металлического тела. Позади единичного ударника в плотной «квазиджидкой» плазме формируются канальные полости, которые схлопываются под действием фонового давления. Захлопывание микрополостей в точку под действием высокого давления по полученным оценкам может приводить к плотности энергии $\geq 10^{15}$ Дж/м³. При этом реализуется динамический фазовый переход. С высокой скоростью кристаллическая решетка металлической матрицы преобразуется в плотную плазму за период времени $\leq 10^{-8}$ с, затем кристаллическая структура восстанавливается. При действии высокого давления ядра вещества слипаются, т. е. реализуется автомоделный процесс инерционного термоядерного синтеза [10].

Наиболее наглядно источник дополнительной энергии, объясняющий процесс ускорения микроударников под действием энергии термоядерного синтеза, можно показать на примере прошивки алюминия. При этом был использован алюминиевый сплав А7 (рис. 1).

Миллионы микровзрывов в объеме металлического твердого тела в условиях сверхглубокого проникания приводят не только к подводу энергии к микроударникам, но и меняют химический состав металлического матричного материала. На рис. 2 и в табл. 4 показаны результаты синтеза в алюминиевом матричном материале А7 (Al = 99,7%).

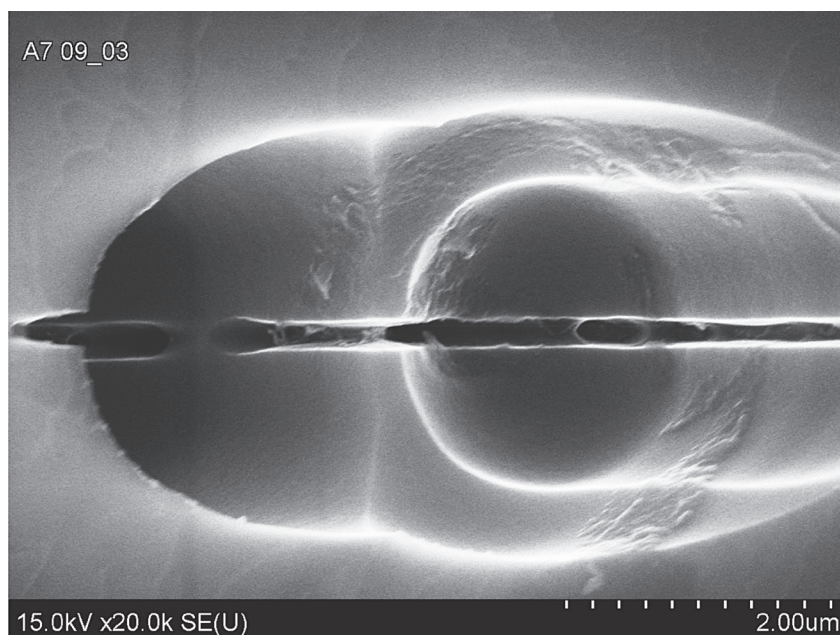


Рис. 1. Результат микровзрыва в зоне трека алюминиевой преграды

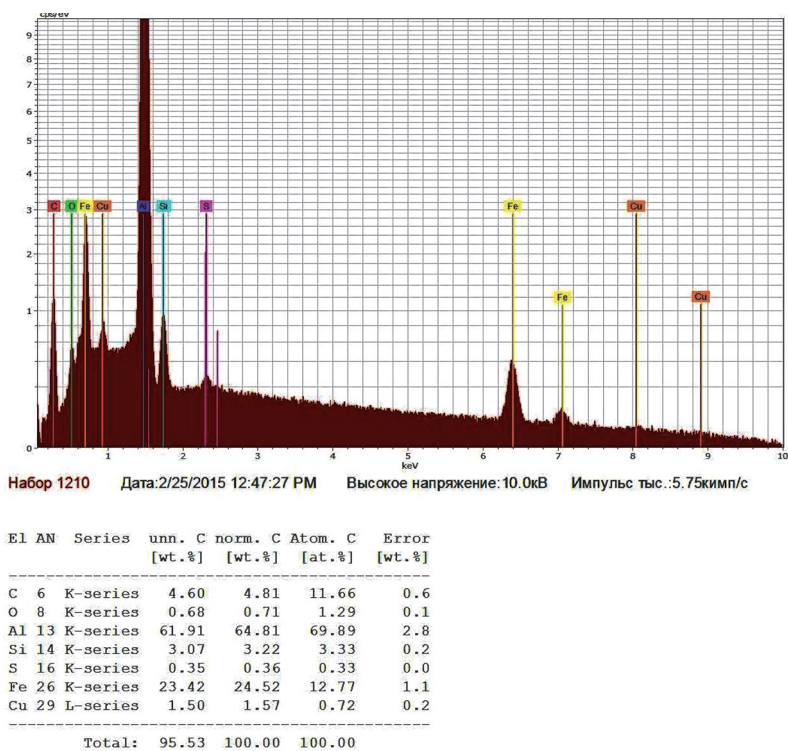


Рис. 2. Синтез легирующего материала (Fe, Cu)

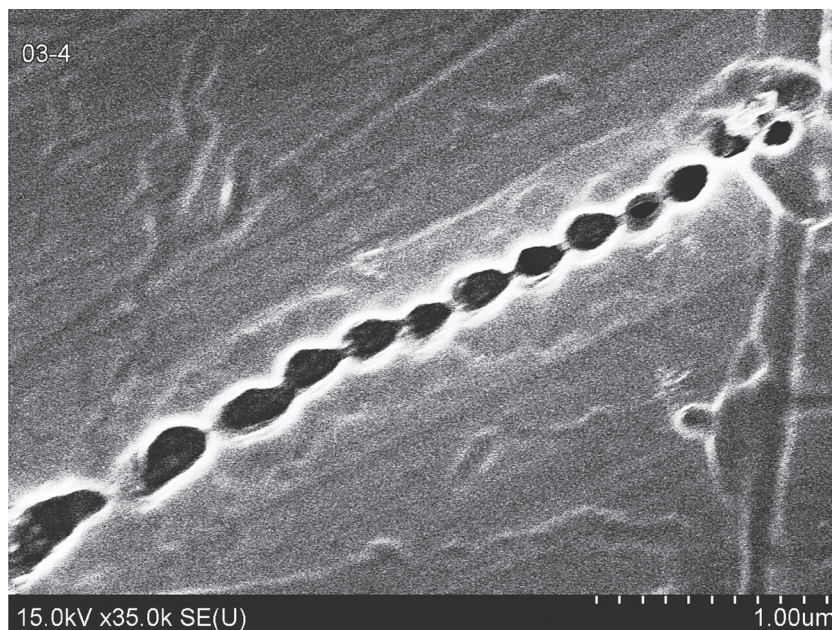


Рис. 3. Трек, возникающий при прошивке алюминия частицей SiC; вытравленные зоны микровзрывов

Таблица 4. Состав зоны легирования (Si) и взрывного синтеза (Fe, Cu)

Элемент	Номер	Серия	norm. C [Wt.%]	Atom. C [Wt.%]	Error [Wt.%]
C	6	К-серия	4,81	11,66	0,6
O	8	К-серия	0,71	1,29	0,1
Al	13	К-серия	64,81	69,89	2,8
Si	14	К-серия	3,22	3,33	0,2
S	16	К-серия	0,36	0,33	0,0
Fe	26	К-серия	24,52	12,77	1,1
Cu	29	Л-серия	1,57	0,72	0,2

На рис. 3 показана трековая зона, созданная прошивкой алюминия (А7) частицей карбида кремния. Микроанализ на участке трековой зоны приведен в табл. 5.

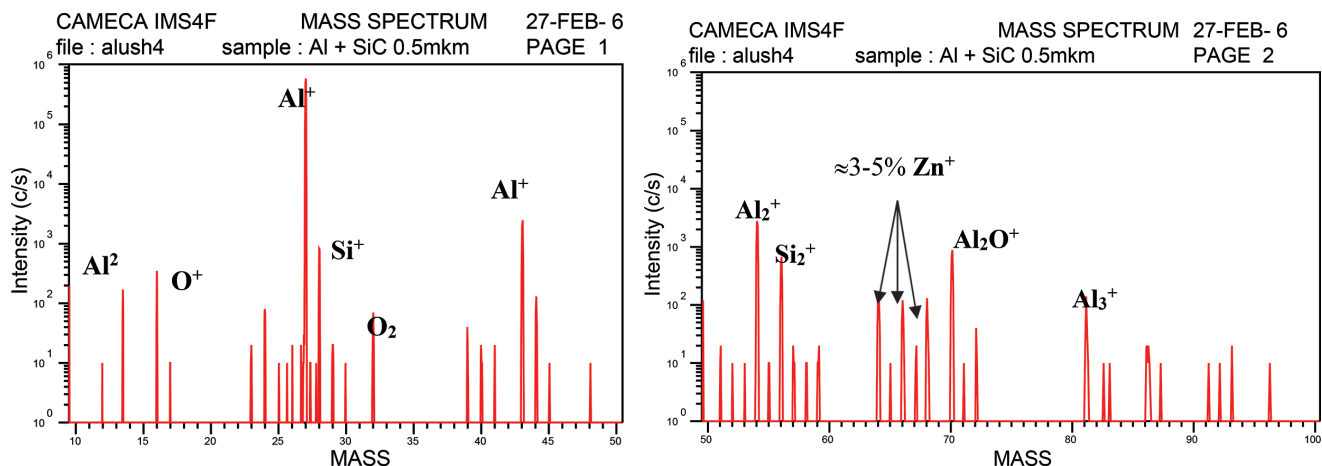


Рис. 4. Синтез изотопов цинка на основе прошивки алюминиевого сплава АК12 сгустками карбида кремния

Т а б л и ц а 5. Состав трековой зоны

Элемент	Номер	Серия	norm. C [Wr.%]	Atom. C [Wr.%]	Error [Wr.%]
C	6	К-серия	16,94	31,30	1,9
O	8	К-серия	5,46	7,57	0,7
Al	13	К-серия	70,08	57,64	2,6
Ti	22	К-серия	7,52	3,49	0,3

Были выполнены оценки легирования вводимым и синтезируемыми в режиме СГП химическими элементами.

Примерную оценку сплава А7 по введенным и синтезированным элементам выполняли, сопоставляя усредненные геометрические элементы по площади анализируемого образца. В поперечном сечении оценочная концентрация введенного кремния – 0,605 мас.%, а в продольном сечении алюминиевого образца – 0,1156 мас.%. Примерная оценка Fe в поперечном сечении алюминиевого образца составляла 4,6 мас.%, а аналогичная оценка в продольном сечении – 0,88 мас.%. Оценка концентрации Си в поперечном сечении этих образцов составляла 0,28 мас.%, а в продольном сечении – 0,0546 мас.%.

Синтез изотопов в объеме металлического материала. На данном уровне знаний нельзя предсказать результаты синтеза новых легирующих элементов или изотопов. Если лигатура при заданных условиях получена (скорость разгона, порошковый состав, размер частиц и матричный металлический материал задаются постоянными), то синтезируемые в процессе динамической обработки химические элементы, в том числе изотопы, образуются устойчиво. На рис. 4 показан анализ сплава АК12, легированного изотопами цинка.

Стоимость изотопов цинка составляет 1000–3000 долл. за 1 г. Подобные результаты были получены при прошивке инструментальной стали Р6М5 сгустками микрочастиц карбида кремния и никеля. В результате такой обработки и последующих закалки и отпуска в объеме режущей стали вырастают армирующие волокна на основе Mn⁵⁵. Эксплуатационная стойкость горного инструмента, армированного таким инструментальным материалом, по сравнению с горным инструментом, армированным ВК8, повысилась в 2,0–2,5 раза. Примерно через три года изотопы железа превратились в изотопы марганца (Fe⁵⁵ → Mn⁵⁵), а эксплуатационная стойкость горного инструмента немного понизилась, но превышала стойкость твердосплавного инструмента в 1,9 раза.

Выводы

В результате дополнительной высокоэнергетической обработки в режиме сверхглубокого проникновения – прошивки металлических литых материалов сгустками микрочастиц реализуется динамическая перестройка металлов и сплавов в качестве композиционных материалов. Преобразование литых металлических материалов в режиме СГП является высокоэнергоёмким процессом.

1. Затраты энергии на прошивку микроударниками металлических заготовок на глубины на десятки и сотни миллиметров, реализуемую за доли секунды, компенсируются за счет многочисленных микровзрывов (термоядерного синтеза) вдоль треков проникания.

2. Микровзрывы реализуются при захлопывании под высоким давлением ($P \geq 10^{15}$ Н/м²) канальных элементов, что приводит к перемещению микрочастиц на тысячи – десятки тысяч калибров.

3. Процесс локального термоядерного синтеза в закрытой системе металлического массивного тела обеспечивает в закрытой зоне синтез новых химических элементов, в том числе новых изотопов, которые отсутствуют в исходном сырье.

4. На данном этапе развития науки и технологии такого термоядерного синтеза не удастся предсказать синтезируемые новые химические элементы, но такие результаты хорошо воспроизводятся при задаваемых исходных условиях.

5. Существующая технология позволяет реализовать объемное легирование массивного металлического тела вводимыми микрочастицами, синтезируемыми химическими элементами и изотопами.

6. Целесообразно продолжить исследования в области разработки технологии синтеза и извлечения редких химических элементов и дорогостоящих изотопов.

7. Процесс СГП, по-видимому, сопровождается интенсивной генерацией высокочастотного излучения и может использоваться как источник электромагнитной энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ушеренко С. М. Особенности взаимодействия потока микрочастиц с металлами и создание процессов объемного упрочнения инструментальных материалов: дис. ... д-ра техн. наук, 1998. 236 с.
2. Usherenko S. M. Modern notions of the effect of superdeep penetration // Journal of Physics and Thermophysics. 2002. Vol. 75. No 3. P. 753–770.
3. Usherenko S. M., Koval O. I., Usherenko Yu. S. Estimation of the energy expended for superdeep penetration// Journal of engineering physics and thermophysics. 2004. Vol. 77. No 3. P. 641–646.
4. The physics of superdeep penetration phenomenon / J. Owsik, K. Jach, S. Usherenko and other // Journal of Technical Physics, J. Tech. Phys. 2008. Vol. 49. No 1. P. 3–25.
5. Maki K., Takano T., Fujiwara A., Yamori A. Radio-wave emission due to hypervelocity impacts in relation to optical observation and projectile speed, Adv. Space Res. 34(5), 1085 (2004).
6. Fletcher A., Close S. «Particle-in-cell simulations of an RF emission mechanism associated with hypervelocity impact plasmas», Physics of plasmas 24, 053102 (2017).
7. High-Energy Method of Transformation of Casting Metals and Alloys to the Composite Materials / Y. Usherenko, S. Usherenko, J. Yazdani // Key Engineering Materials, Vol. 721, pp. 290–294.
8. Composite Materials for Steel Cutting and Concrete Crushing / Y. Usherenko, S. Usherenko, J. Yazdani // Procedia Engineering 172 (2017) 1198–1203.
9. Ушеренко С. М., Ушеренко Ю. С., Кирилук В. П. Энергетика процесса сверхглубокого проникания // Сб. науч. тр., посвященных 40-летию кафедры «Материаловедение в машиностроении» «Перспективы развития поверхностного и объемного упрочнения сплавов». Минск: БНТУ.2004. С. 37–47.
10. Sobolev V. V., Usherenko S. M. Shock-wave initiation of nuclear transmutation of chemical elements// J. Phys, IY France, 2006, Vol. 134 134, P. 977–982.

REFERENCES

1. Usherenko S. M. Osobennosti vzaimodejstviya potoka mikrochastits s metallami i sozdanie processov ob`emnogo uprochneniya instrumental'nyh materialov. Diss. dokt. tekhn. nauk [Features of the interaction of the flow of microparticles with metals and the creation of processes of volumetric hardening of tool materials. Dr. tech. sci. diss]. 1998, 236 p.
2. Usherenko S. M. Modern notions of the effect of superdeep penetration// Journal of Physics and Thermophysics, 2002, Vol. 75, no. 3, pp. 753–770.
3. Usherenko S. M., Koval O. I., Usherenko Yu. S. Estimation of the energy expended for superdeep penetration// Journal of engineering physics and thermophysics, 2004, Vol. 77, no. 3, pp. 641–646.
4. The physics of superdeep penetration phenomenon. J. Owsik, K. Jach, S. Usherenko and other. Journal of Technical Physics, J. Tech. Phys., 2008, Vol. 49, no. 1, pp. 3–25.
5. Maki K., Takano T., Fujiwara A., Yamori A. Radio-wave emission due to hypervelocity impacts in relation to optical observation and projectile speed, Adv. Space Res. 34(5), 1085 (2004).
6. Fletcher A., Close S. «Particle-in-cell simulations of an RF emission mechanism associated with hypervelocity impact plasmas», Physics of plasmas 24, 053102 (2017).
7. High-Energy Method of Transformation of Casting Metals and Alloys to the Composite Materials / Y. Usherenko, S. Usherenko, J. Yazdani // Key Engineering Materials, Vol. 721, pp. 290–294.
8. Composite Materials for Steel Cutting and Concrete Crushing /Y. Usherenko, S. Usherenko, J. Yazdani // Procedia Engineering 172, 2017, pp. 1198–1203.
9. Usherenko S. M., Usherenko Ju. S., Kiriljuk V. P. Jenergetika processa sverhglubokogo pronikanija [Energy of the process of ultra-deep penetration]. Sbornik nauchnyh trudov, posvjashhennyh 40-letiju kafedry «Materialovedenie v mashinostroenii» «Perspektivy razvitija poverhnostnogo i ob`emnogo uprochneniya spлавov» [Collection of scientific papers devoted to the 40th anniversary of the department «Materials science in mechanical engineering» «Prospects for the development of surface and bulk hardening of alloys»]. Minsk, BNTU Publ., 2004, pp. 37–47.