

МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ СИЛЬНОТОЧНЫМИ РЭП МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

В.В. Уваров¹, В.Ф. Клепиков², В.В. Литвиненко², А.Г. Пономарев¹, В.И. Шеремет¹

¹ *Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт";*

² *Научно-технический центр электрофизической обработки НАН Украины, г. Харьков, Украина*

Рассматривается возможность изменения структуры и свойств поверхностных слоев некоторых конструкционных материалов сильноточными релятивистскими электронными пучками микросекундной длительности.

1. ВВЕДЕНИЕ

Состояние и свойства приповерхностных слоев металлов и сплавов часто играют определяющую роль при использовании их в качестве конструкционных материалов. Обработка изделий концентрированными потоками энергии дает возможность целенаправленно модифицировать свойства данных слоев [1-3]. В качестве энергетических потоков, как правило, используются пучки электронов, плазменные потоки, лазерное излучение. Механизмом их воздействия является быстрый нагрев поверхности (в ряде случаев вплоть до переплава) на различную глубину в зависимости от энергии и вида излучения с последующим быстрым охлаждением. Следует отметить, что в результате неоднородности распределения энергии по сечению воздействующего пучка значения модифицируемых параметров, например, микротвердости, имеют различные значения на поверхности облучаемого объекта.

Авторами работы [3] показано, что воздействие на алюминиевый сплав Д16 сильноточными релятивистскими электронными пучками (РЭП) приводит к измельчению микроструктуры. В работе [4] отмечается, что под действием мощных пучков микросекундной длительности в твердотельной мишени создаются осцилляции давления, проявляющиеся в волнообразных изменениях микротвердости вдоль зоны воздействия пучка. При этом в качестве источника возникновения осцилляций рассматривается волна сжатия, возникающая вследствие образования внутри мишени парогазовой полости. В ряде случаев для получения новых конструкционных материалов обработку концентрированными потоками энергии совмещают с введением легирующих добавок [2].

Представляется актуальным на примере конструкционного сплава Д 16 и инструментальных сталей 45, ХВГ, Р-18, а также твердого сплава ВК-8 изучить влияние термоиницированных и динамических воздействий на характер сегрегации примесей и фазовых превращений в материале мишени при различных режимах облучения сильноточными РЭП.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Пластины из сплава Д16 толщиной 4 мм, образцы сталей 45, ХВГ и Р-18, а также твердосплавные резцы ВК-8 подвергались облучению сильноточным РЭП с плотностью мощности $10^6 \dots 10^9 \text{ Вт/см}^2$ и длительностью импульса тока $(3 \dots 5) \cdot 10^{-6}$ с. Облучение происходило в вакуумной камере дрейфа ускорителя МИГ-1 [5]. Пучок транспортировался в однородном магнитном поле с индукцией до 1 Тл. Применялись катоды различной конфигурации, позволяющие получать сильноточные РЭП с плотностью тока в широких пределах, что, в свою очередь, влияло на характер взаимодействия пучка (сплошного или трубчатого) с твердотельной мишенью.

Исследования состава поверхностного слоя алюминиевого сплава Д16 до и после облучения проводились методом вторичной ионной масс-спектрометрии на диагностической установке "Элион-2" в вакууме порядка $2 \cdot 10^{-6}$ Па. Чувствительность элементного анализа составляла $< 10^{-3}$ ат%. Распыление исследуемой поверхности производилось пучком ионов аргона с энергией 4 кэВ, током $(10^6 \dots 10^5)$ А на глубину до 1 мкм.

Пять образцов, вырезанных из необлученной и облученной зоны пластины, чередовались при записи масс-спектров в прямой и обратной последовательности, чтобы исключить возможные влияния остаточной атмосферы в камере анализатора.

Облучение вышеперечисленных образцов происходило в условиях вакуума $\sim (10^{-4} \dots 10^{-5})$ торр.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

При облучении сплава Д16 сильноточным РЭП с плотностью мощности $\sim 10^9 \text{ Вт/см}^2$ (режим формирования и фокусировки трубчатого РЭП) характер взаимодействия его со сплавом Д16 происходит в экстремальных условиях. При быстром нагреве материал, уносимый с поверхности мишени (абляция мишени) создает давление, сжимающее мишень. В результате, в образце из сплава Д16 распространяется ударная волна сжатия, наличие которой в облучен-

ной среде приводит к разрушению поверхности материала мишени. При этом потеря массы мишени из сплава Д16, определенная взвешиванием после однократного облучения, составила 0,27 г/см². Основными характеристиками ударной волны, обуславливающими изменения в твердом теле, являются амплитуда давлений, скорость распространения фронта волны и его ширина.

При прохождении ударной волны, происходящие большие пластические деформации могут существенно повысить плотность дислокаций, что влечет за собой возрастание упругой энергии взаимодействия (латентной энергии) дислокационного скопления – ансамбля дислокаций [6]. Движение различных групп дислокаций ансамбля приводит к возникновению потока дефектов, которые осуществляют перенос латентной энергии. Концентрация энергии в местах максимальных градиентов пластической деформации приводит к релаксации, следствием которой является перестройка дислокационной структуры. В этом случае запасенная в ядре дислокаций латентная энергия превращается в поверхностную энергию микротрещин.

При облучении сплава Д16 сплошными РЭП при более низкой плотности мощности (~10⁷)Вт/см² режим абляции меняется на режим оплавления приповерхностного слоя. Застывание расплавленного слоя в условиях большого градиента температур и высоких давлений [7] приводит к направленной кристаллизации расплава в неравновесных условиях, получению мелкокристаллических и аморфных структур (при скорости охлаждения >10⁶град/с) [8]. В приповерхностном слое происходит закалка вакансий и возникают большие напряжения сжатия, которые вызывают образование трещин на поверхности облученного сплава (рис. 1). При этом можно ожидать некоторого распределения компонентов сплава, что

может привести к изменению свойств приповерхностного слоя.

Известно, что при больших скоростях кристаллизации наблюдается слабая сегрегация примесей, так как их перераспределение лимитируется диффузией в жидкой фазе. Однако на расстоянии порядка длины диффузионного переноса этим эффектом пренебрегать нельзя.

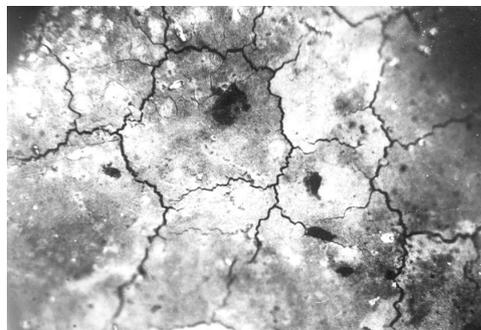


Рис. 1. Микроструктура облученного сплава Д16

В изменение состава приповерхностных слоев может вносить вклад также вытеснение движущейся границей твердое тело – расплав различного рода термодинамически устойчивых соединений типа силикатов, алюминатов и др. [9]. Наконец, изменения состава можно ожидать в связи с тем, что поверхность нагретого в вакууме расплава в процессе испарения обедняется наиболее летучими компонентами.

В отличие от исходной поверхности, облученная поверхность сплава Д16 имеет матовый серо-голубой оттенок, что косвенно свидетельствует о наличии на поверхности слоев с измененными свойствами.

На рис.2 показаны масс-спектры поверхности облученных и необлученных образцов из сплава Д16.

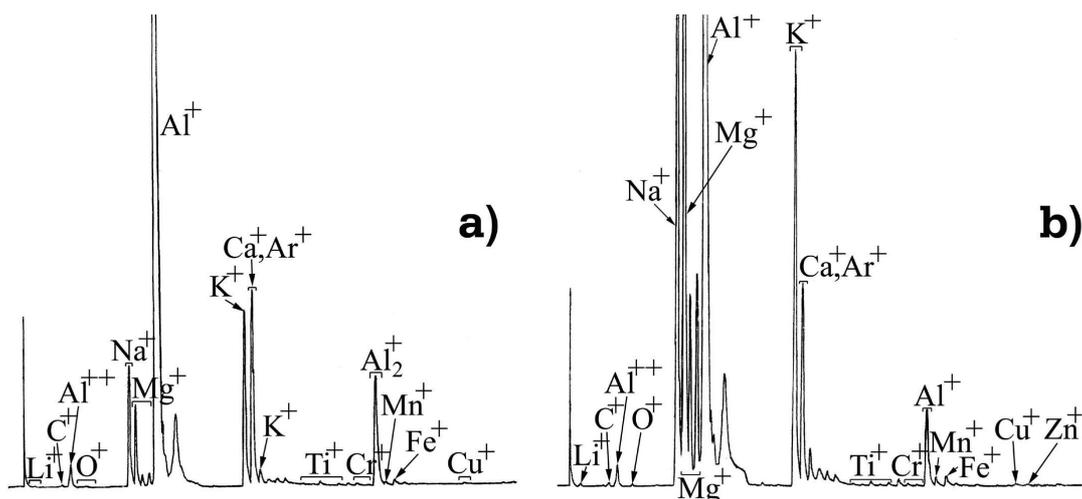


Рис. 2. Масс-спектры поверхностных слоев сплава Д16 до (а) и после облучения РЭП (b). Коэффициент усиления = 10⁸

Их сопоставление указывает на значительные изменения элементного состава после облучения силь-

ноточным РЭП. В частности, интенсивность пика магния облученной пучком поверхности выросла в

14 раз по сравнению с исходной. Увеличились концентрации и других компонентов облученного спла-

ва Д16 (меди, марганца, железа и др. элементов), что отражено в таблице.

Соотношение между интенсивностями пиков элементов сплава Д16 до и после облучения СРЭП

Элемент	Al ⁺⁺	Li ⁺	Al ⁺⁺	Li ⁺	Ti ⁺	Cu ⁺	Zn ⁺	Fe ⁺	Mn ⁺	K ⁺	Na ⁺
I _{исх.} , мм	63	1	63	1	42	19	7	95	72	65	55
I _{облвч.} , мм	50	4	50	4	73	46	15	168	144	150	165
I _{исх.} /I _{облвч.}	0,8	4	0,8	4	1,7	2,4	2,1	1,8	2,0	2,3	3,0
Коэффициент усиления	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁹	10 ¹⁰	10 ⁸	10 ⁸				

Исследовалось также воздействие сильноточного РЭП на поверхность сталей 45, ХВГ, Р-18. Было установлено, что при облучении Ст45 в режиме оплавления (плотность мощности пучка (10⁶...10⁸) Вт/см²) отчетливо различаются две зоны воздействия – зона оплавления и зона термического влияния. Зона оплавления толщиной ~30 мкм имеет пониженную травимось и представляет собой мелкодисперсный мартенсит с микротвердостью, превышающей 10 ГПа. Зона термического влияния толщиной 40 мкм (рис.3) отличается тем, что перлит, окружающий ферритные зерна, при быстром нагреве и охлаждении превращается в мартенсит с микротвердостью (8...10) ГПа, при этом ферритные зерна почти не изменяют свою форму и размеры.

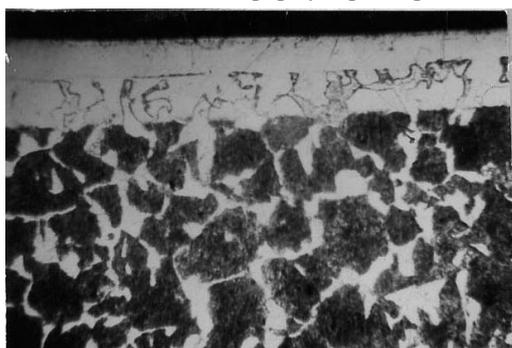


Рис. 3. Микроструктура облученной Ст. 45

Изучена возможность проведения закалки сильноточным РЭП без оплавления (облучение мишеней проводилось в зоне развала РЭП, т.е. когда плотность мощности пучка близка к минимальной). При обработке сталей 45, ХВГ и Р-18 установлено, что микротвердость поверхности стали ХВГ (рис. 4) повысилась до 4...5 ГПа (исходная равна 2,3 ГПа) в режиме без оплавления и до (5...7) ГПа в режиме с оплавлением.



Рис. 4. Микроструктура облученной стали ХВГ

Многочисленная обработка пучком практически не влияет на повышение микротвердости стали ХВГ. Лишь в режиме с оплавлением изменяется морфология поверхности – она постепенно сглаживается. После обработки пучком поверхности стали 45 микротвердость повысилась до 8,3 ГПа. Закаливаемость этой стали в меньшей степени зависит от плотности мощности пучка, чем стали ХВГ.

Образцы из быстрорежущей стали Р-18 подвергались облучению РЭП после предварительной объемной закалки. Обработка этой стали в режиме без оплавления приводит к ее отпуску – микротвердость уменьшается до (5...6) ГПа.

Образцы из твердого сплава ВК-8 облучались в режиме оплавления, микротвердость облученных образцов увеличивалась на 10%. Установлено также, что облученная поверхность этого сплава обогащена кобальтом (по результатам масс-спектрометрических измерений). Многочисленное облучение сплава ВК-8 приводит к сглаживанию поверхности, однако мало влияет на твердость.

Анализ результатов воздействия сильноточным РЭП на указанные выше стали показывает, что эффект облучения их пучками с указанными параметрами сводится, в основном, к быстрому нагреву поверхности и ее охлаждению вследствие отвода тепла внутрь образцов. Закалка поверхностного слоя импульсным РЭП в режиме без оплавления позволяет упрочнять поверхностные слои штампового инструмента без послезакалочного коробления. Это дает возможность применять для изготовления штамповой оснастки углеродистые стали вместо дорогостоящей стали ХВГ.

Был опробован и другой подход к проблеме модификации свойств поверхностных слоёв, согласно которому микросекундные РЭП использовались для дистанционной наплавки слоёв различного состава на поверхность изделий [10]. Характерной особенностью такого способа наплавки является то, что энергия РЭП высаживается не на поверхность подложки, а на мишень, расположенную на некотором расстоянии от неё. Плотность мощности пучка подбирается такой, чтобы ее хватило на плавление и испарение наплавляемого слоя. Под действием реактивной силы наплавляемый слой ускоряется и с большой скоростью сплавляется с практически холодной подложкой. Таким образом, появляется возможность наносить тугоплавкие материалы, в частности твердые сплавы, на более легкоплавкое и дешевое основание. Так, например, на инструмен-

тальную сталь Р-18 было нанесено покрытие из смеси порошков бора и вольфрама. Микротвердость поверхности стали увеличилась до 14 ГПа (исходная 8ГПа). Полученные результаты дают основания утверждать, что данный способ нанесения поверхностных слоев с наперед заданными свойствами является перспективным для использования его в радиационно-пучковых технологиях.

4. ВЫВОДЫ

Применение высокоэнергетических РЭП микросекундной длительности с уровнем мощности ($10^7 \dots 10^8$) Вт/см² открывает новые возможности для изменения структуры и свойств приповерхностных слоев конструкционных материалов для улучшения их эксплуатационных характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.В. Лазаренко, В.А. Иванов, В.Т. Ковалев. Термообработка металлов импульсным электронным пучком // *Доклады IV Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве*. Ленинград, 1982, с. 97–102.
2. И.М. Неклюдов, В.В. Воеводин. Принципы модификации конструкционных материалов путем легирования и механико-термической обработки // *Труды научно-практического симпозиума «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении»*. Харьков, 2000, с. 59–64.
3. V.F. Klepikov, V.T. Uvarov, V.F. Kivshik et al. Modification of the D16 aluminium alloy structure by pulsed relativistic electron beam // *ВАНТ сер. «Ядерно-физические иссл.»*. 2001. №3(38), с. 187–188.
4. Yu.E. Kolyada. Formation of a layered structure of a metal strengthening zone under irradiation with the pulsed high-current electron beam // *ВАНТ сер. «Ядерно-физические иссл.»*. 2001, № 3 (38), с. 184–186.
5. В.Т. Уваров, Ю.В. Ткач, Н.П. Гадецкий и др. *Получение высокоэнергетических пучков микросекундной длительности с высоким КПД* /Препринт ХФТИ. 84-30. Харьков, 1984.
6. В.И. Владимиров. *Физическая природа разрушения металлов*. М.: «Металлургия». 1989.
7. Ю.В. Ефимов. Сверхбыстрое охлаждение металлических расплавов при высоком внешнем давлении // *ФиХОМ*. 1988, №6, с. 97–101.
8. Ю.К. Ковнеристый, Э.К. Осипов, Е.А. Трофимов. *Физико-химические основы создания аморфных металлических сплавов*. М.: «Наука», 1983, 145 с.
9. В.А. Федоров. Состав и структура упрочненного поверхностного слоя на сплавах алюминия, получаемого при микродуговом окислении // *ФиХОМ*. 1988, №4, с. 92.
10. В.И. Шеремет, В.Т. Уваров, Ю.В. Ткач, А.В. Пашенко. *Способ нанесения покрытий на подложку*. /А.С. СССР №1630154. 1989.

МОДИФІКАЦІЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ СТАЛЕЙ ТА СПЛАВІВ СИЛЬНОСТРУМОВИМИ РЕП МІКРОСЕКУНДНОЇ ТРИВАЛОСТІ

В.В. Уваров, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, А.Г. Пономарев, В.І. Шеремет

Розглядається можливість зміни структури та властивостей поверхневих шарів деяких конструкційних матеріалів сильнострумовими релятивістськими електронними пучками микросекундної тривалості.

THE MODIFICATION OF PROPERTIES OF SURFACE LAYERS OF STEELS AND ALLOYS BY HIGH-CURRENT REB WITH MICROSECOND DURATION

V.V. Uvarov, V.F. Klepikov, V.V. Litvinenko, A.G. Ponomarev, V.I. Sheremet

The possibility of changes of structure and properties of surface layers in various construction materials by high-current REB with microsecond duration is considered.