

ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТИРОВАНИЯ ИОНОВ МЕДИ И СВИНЦА НА СВОЙСТВА СТАЛИ 30ХГСН2А *

В. В. Овчинников, С. В. Якутина, Д. А. Козлов, А. С. Немов

В статье представлены результаты исследования распределения ионов меди и свинца в поверхностном слое стали 30ХГСН2А, модифицированной в условиях высокодозовой имплантации с варьированием последовательности имплантирования ионов. Установлено, что при имплантации стали 30ХГСН2А ионами меди и свинца отмечается существенное различие в их распределении в поверхностном слое в зависимости от схемы осуществления процесса. Показано, что наибольшая глубина проникновения ионов наблюдается при совместном имплантировании указанных ионов с дозой имплантации 10^{17} ион/см².

Ключевые слова: ионная имплантация, сорт ионов, доза облучения, интенсивность ионного пучка, сталь, ионы меди и свинца, глубина проникновения ионов, метод вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС), усталость, дислокационная структура.

Введение

Ионная имплантация относится к наиболее перспективным методам контролируемого введения примесей в металлы. Важная особенность этого метода – возможность внедрения в мишень любых элементов, причем концентрация внедренной примеси может существенно превышать предел растворимости данной примеси в веществе мишени, так как имплантация ионов – процесс термодинамически неравновесный.

Большой интерес представляет использование ионной имплантации для создания деталей высоконагруженных пар трения, которые должны сочетать высокие прочностные свойства с низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью. В связи с этим поиск путей повышения износостойкости и антифрикционных свойств сталей типа 30ХГСН2А является актуальной научной и практической задачей.

Для снижения коэффициента трения трущихся пар в металлы вводят ионы Mo^{+} , S^{+} , Zn^{+} , Sn^{+} , Se^{+} , Pb^{+} , Cu^{+} и других элементов [1–5]. В работах [6–8] показано положительное влияние имплантации ионов меди, а также предварительной имплантации ионов железа на коэффициент трения стали 30ХГСН2А. В последнем случае отмечено несколько более глубокое проникновение ионов меди в материал мишени.

Цель представленной работы – исследование влияния последовательности имплантации ионов меди и свинца на структурно-фазовое состояние поверхностного слоя, усталостные и трибологические свойства стали 30ХГСН2А.

Экспериментальная часть

Исследования структуры модифицированной поверхности проводились на образцах в виде пластин размерами $30 \times 30 \times 2$ мм из стали 30ХГСН2А (табл. 1).

* Работа выполнена по государственному контракту №П651 в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Эти образцы перед ионной имплантацией подвергались термической обработке: закалка при температуре 900–910 °С с охлаждением в масле и последующий отпуск при температуре 210 °С в течение двух часов. Такая обработка позволяет достигнуть твердости стали 30ХГСН2А на уровне 42–45 HRC (табл. 2).

Ионную имплантацию проводили на двухлучевой установке с источником, относящимся к источникам с вакуумной дугой, формирующим полиэнергетический пучок ионов, который в своем составе имеет как одно-, так и многозарядные ионы. Эта установка отличается наличием двух независимых источников ионов (лучей) – ионов металлов и ионов газов.

Установка состоит из источника ионов металлов ИГМИ-50, источника ионов газов ГИГ-25, системы охлаждения, вакуумной системы, си-

стемы измерения вакуума, рабочей камеры, системы измерения дозы имплантируемых ионов, блока управления вакуумной системой. Ускоряющее напряжение при имплантации стали 30ХГСН2А ионами меди и свинца составило 30 кВ при остаточном давлении в рабочей камере 5×10^{-5} мм рт. ст., а температура в камере не превышала 80 °С.

Для исследования влияния последовательности имплантации ионов меди и свинца (табл. 3) на характер их распределения в модифицированном слое стали 30ХГСН2А обрабатывалась партия образцов по вариантам, представленным в табл. 4.

Металлографический анализ структуры имплантированных слоев проводился с помощью оптического металлографического микроскопа Carl Zeiss при увеличении в 1000 раз. Съемку

Таблица 1

Химический состав стали 30ХГСН2А, масс. %

С	Mn	Cr	Si	Ni	S	P
					не более	
0,29	0,62	0,35	0,26	1,72	0,25	0,25

Таблица 2

Механические свойства стали 30ХГСН2А

σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU Дж/м ² •см	HRC после отжига, не более
1640	1390	10	42	56	43

Таблица 3

Характеристики ионов, используемых при имплантации

Характеристика	Сорт ионов	
	медь (Cu)	свинец (Pb)
Относительная атомная масса	63,55	207,20
Атомный радиус, Нм	0,128	0,175
Температура плавления, °С	1083	327
Твердость НВ	35	4

Таблица 4

Варианты имплантации исследуемых образцов

Вариант имплантирования	Доза имплантации, ион/см ²	Сорт ионов	Последовательность имплантирования	
			первый элемент	второй элемент
I	10 ¹⁷	Cu	Cu	нет
II	10 ¹⁷	Pb	нет	Pb
III	10 ¹⁷	Cu, Pb	Cu	Pb
IV	10 ¹⁷	Cu, Pb	Pb	Cu
V	10 ¹⁷	Cu, Pb	Сплав: Cu 64% и Pb 36%	
Примечание: ускоряющее напряжение (<i>U</i>) – 30 кВ; плотность тока ионного пучка (<i>J</i>) – 0,1 А.				

микроструктуры проводили специальной, встроенной в микроскоп видеокамерой, полученное изображение преобразовывалось в цифровой сигнал, который затем обрабатывался на компьютере с помощью специального программного обеспечения и выводился на экран монитора с возможностью сохранения снимков.

Для анализа распределения внедренных ионов по глубине, а также исследования перераспределения в результате имплантации уже имеющихся элементов в стали 30ХГСН2А в данной работе был применен метод вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС).

Метод заключается в распылении поверхности пучком первичных ионов, в результате чего происходит выбивание нейтральных атомов, ионизированных молекул и ионов материала матрицы (стали 30ХГСН2А), а также положительно и отрицательно заряженных ионов исследуемых элементов (Cu, Pb), называемых вторичными, и регистрации их масс-анализатором.

Высокочувствительное масс-спектрометрическое измерение количества вторичных ионов — основа метода анализа состава поверхности и объема твердых тел. Наиболее важными характеристиками метода масс-спектрометрии вторичных ионов являются: очень низкий порог чувствительности для большинства элементов (меньше $10^{-4}\%$ ат.); возможность измерения профилей концентрации малых количеств примесей с разрешением по глубине менее 50 Å; пространственное разрешение порядка микрометра; возможность изотопного анализа и определение всех элементов и изотопов, начиная с водорода.

Профили распределения имплантированных ионов меди и свинца исследовали на установке *Physical Electronics PHI-6600 SIMS System*. Образец для исследования представлял собой пластину размерами $10 \times 15 \times 2,5$ мм, одна сторона которого перед имплантацией была отполирована.

Режимы, при которых выполнялось исследование профиля распределения, следующие: в качестве первичного пучка применялись ионы кислорода; ускоряющее напряжение на источнике — 7 кВ; сила тока — 300 нА; диаметр первичного пучка ионов — 50 мкм; угол наклона пучка относительно нормали поверхности — 60 град.

Усталостные испытания имплантированных и контрольных (неимплантированных) образцов выполнялись на машине МУИ-6000 в условиях чистого кругового изгиба с частотой 3000 об/мин и при напряжении цикла

$\sigma = 500$ МПа. Использовались образцы типа II (ГОСТ 25.502–79).

После испытаний на усталость с помощью электронного микроскопа фирмы *Karl Zeiss* марки *evo-50* изучалась микроструктура модифицированной поверхности изломов образцов и определялось содержание легирующих элементов в исследуемой области.

Результаты исследований

Микроструктура стали 30ХГСН2А (матрицы) в исходном состоянии представляет собой мартенсит отпуска. После ионной имплантации на поверхности появилась тонкая нетравящаяся светлая полоска. Следующая за ней темная область, по всей видимости, состоит из химически активных слоев. Далее наблюдается исходная структура матрицы. Обнаружить какие-либо изменения внутри нетравящейся полоски с помощью оптического микроскопа не представляется возможным.

Методом вторично-ионной масс-спектрометрии получены зависимости интенсивности вторичных ионов (I , ион./с) от глубины имплантированного слоя (h , нм).

На основе анализа интенсивности вторичных ионов установлено, что при имплантации одного сорта ионов (вариант I и II) распределение по глубине имеет одинаковый характер вне зависимости от сорта ионов. Максимум насыщения элементом приходится на поверхность имплантированного слоя (рис. 1 и 2). Значительное снижение содержания меди в варианте I происходит по глубине до 50 нм, а свинца в варианте II — по глубине до 30 нм. На глубине от 100 до

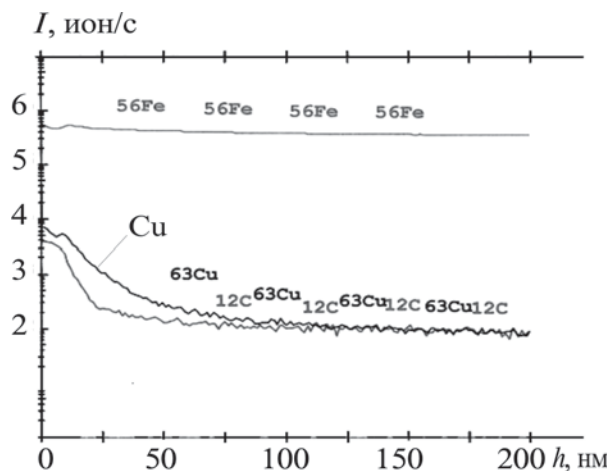


Рис. 1. Распределение ионов меди, железа (матрица), углерода (матрица) в поверхностном слое стали 30ХГСН2А при имплантации меди по I варианту

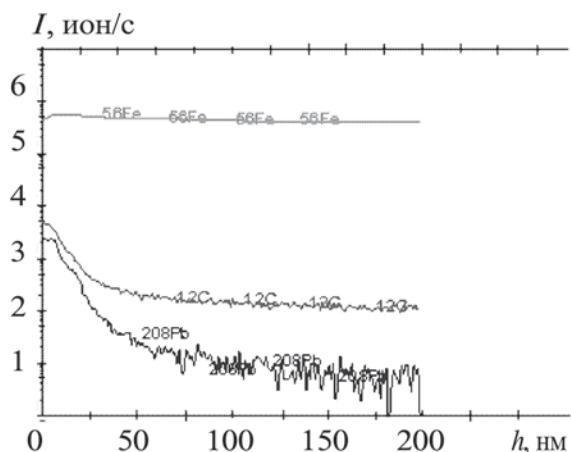


Рис. 2. Распределение ионов свинца, железа (матрица), углерода (матрица) в поверхностном слое стали 30ХГСН2А при имплантации свинца по II варианту

200 нм слоя происходит стабилизация концентрации меди (вариант I), а концентрация свинца (вариант II), напротив, – очень нестабильна уже на глубине от 50 нм и далее по всему слою. Существенного различия концентрации углерода в имплантированном слое по этим вариантам не наблюдается. На глубине 100–200 нм при имплантации меди концентрация углерода одного порядка с концентрацией меди.

В варианте III и IV при разной последовательности имплантации ионов меди и свинца отмечаются значительные различия в распределении этих элементов (рис. 3 и 4). В случае предварительной имплантации ионами меди и последующей имплантации ионами свинца (вариант III) пик насыщенности медью наблюдается на глубине 40 нм, а концентрация свинца значительно не меняется до этой глубины (см. рис. 3).

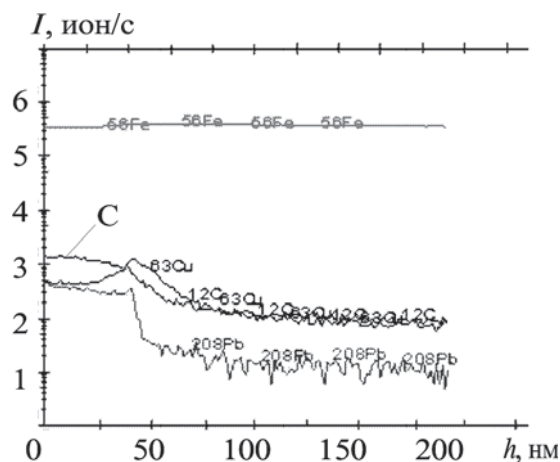


Рис. 3. Распределение ионов меди, свинца, железа (матрица), углерода (матрица) в поверхностном слое стали 30ХГСН2А при имплантации меди и свинца по III варианту

Таким образом, можно предположить, что ионы свинца, соударяясь с ионами меди «вбивают» их на эту глубину, а сами теряют энергию и насыщают поверхность модифицированного слоя. Это объясняет и дальнейшее резкое, почти мгновенное падение концентрации свинца. На глубине 100–200 нм концентрация свинца нестабильна, но в меньшей степени, чем в вариантах II, IV. Концентрация меди в этом интервале стабильна и одного порядка с концентрацией ее в вариантах I и IV.

При предварительной имплантации ионами свинца и последующей имплантации ионами меди (вариант IV) максимальное насыщение этими элементами приходится на поверхность имплантированного слоя (см. рис. 4). Причем до глубины 30 нм концентрация меди значительно не меняется и равномерно насыщает слой, а концентрация ионов свинца резко падает и стремится к нулю. Равномерно насыщенный слой медью можно объяснить значительной потерей энергии отдельных ионов меди при столкновении с атомами подложки и имплантированными ионами свинца. Эта потеря энергии не позволяет им проникать вглубь, и они концентрируются на поверхности имплантированного слоя. Далее на глубине от 30 до 100 нм концентрация ионов меди уменьшается, и на глубине 100–200 нм она не меняется.

При совместной имплантации ионов меди и свинца в составе сплава Cu–Pb (вариант V) наблюдается увеличение проникновения ионов этих элементов в 2 раза по сравнению с вариантами I – IV (рис. 5). Максимальное насыщение имплантируемых элементов приходится на

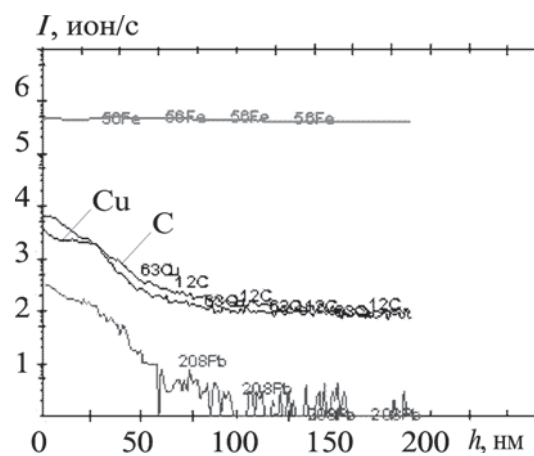


Рис. 4. Распределение ионов свинца, меди, железа (матрица), углерода (матрица) в поверхностном слое стали 30ХГСН2А при имплантации свинца и меди по IV варианту

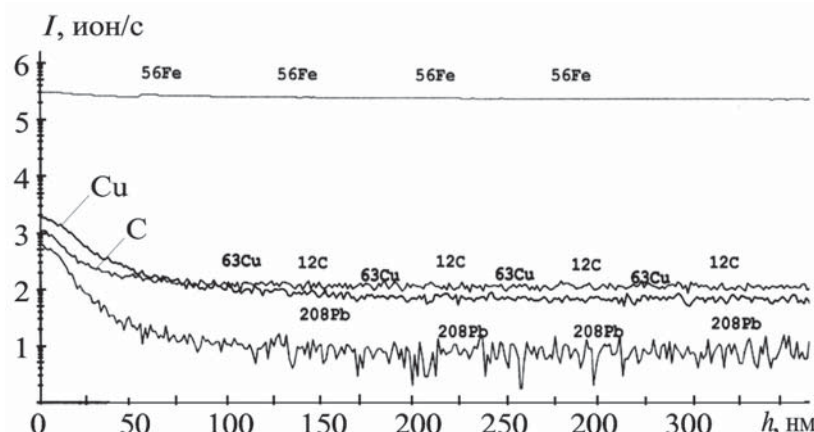


Рис. 5. Распределение ионов меди, свинца, железа (матрица), углерода (матрица) в поверхностном слое стали 30ХГСН2А при имплантации сплава по варианту V

поверхность и снижается по глубине до 50 нм. На глубине от 50 нм до 430 нм слой равномерно насыщен медью. Концентрация углерода – одного порядка с концентрацией меди. Концентрация свинца на этой глубине значительно ниже концентрации меди.

Анализируя характер распределения меди при разных вариантах имплантации (по полученным зависимостям методом ВИМС), в первом приближении можно заключить, что если медь – единственный или заключительный легирующий элемент, то характер ее распределения будет схож: пик насыщенности – на поверхности и дальнейшее значительное снижение ее концентрации по глубине до 50 нм.

При предварительной имплантации ионами свинца пик насыщенности медью приходится не на поверхность, а на глубину 40 нм от поверхности мишени. Далее концентрация меди значительно снижается до глубины 75 нм.

Полученные результаты показывают, что при имплантации стали 30ХГСН2 ионами свинца и меди при использовании в качестве материала катода сплава (Cu 64% и Pb 36%) существенно увеличивается толщина имплантированного слоя по сравнению с вариантами I – IV. По-видимому, это явление связано с формированием большого числа радиационных дефектов в стали. По этим дефектам происходит проникновение в материал ионов меди и свинца на большую глубину по сравнению с остальными вариантами при одинаковой дозе имплантации.

Исследование субструктуры имплантированного слоя проводили методом просвечивающей электронной дифракционной микроскопии. Фольги готовили из пластинок стали 30ХГСН2А после имплантации по изучаемым вариантам.

У исходных образцов стали 30ХГСН2А

(неимплантированные) основным типом дислокационной субструктуры является сетчатая структура и структура дислокационного хаоса (рис. 6, а). Дислокационная структура образцов, имплантированных ионами только меди или свинца, проявляется в виде жгутов (рис. 6, б). Такой же характер имеет субструктура образца, имплантированного по варианту IV.

Вариант III, при котором предварительно имплантируются ионы меди, а затем ионы свинца, приводит к возникновению в субструктуре дислокационных ячеек (рис. 6, в). Субструктура образцов, имплантированных по варианту V, характеризуется ярко выраженными дислокационными фрагментами (рис. 6, г).

Анализ результатов проведенных усталостных испытаний позволил установить, что наибольший в данных условиях эффект обеспечивает имплантация одновременно ионов меди и свинца (вариант V) при дозе 10^{17} ион/см² (табл. 5).

Фрактографический анализ поверхности разрушения образцов после усталостных испытаний показал, что во всех случаях трещины зарождаются внутри образца и распространяются к его поверхности. В зависимости от варианта имплантирования образцов стали 30ХГСН2А проявляются различия в ширине зоны долома, которая для образцов, имплантированных по варианту V, будет наибольшей. Разрушение носит межзеренный пластичный характер с наличием усталостных бороздок (рис. 7), что, по-видимому, связано с возникновением высоких сжимающих напряжений в модифицированном слое при имплантации сплава меди и свинца.

С помощью растрового электронного микроскопа *Karl Zeiss evo-50* исследовано содержание имплантируемых элементов в слое глубиной 5 нм от поверхности образца. Полученные

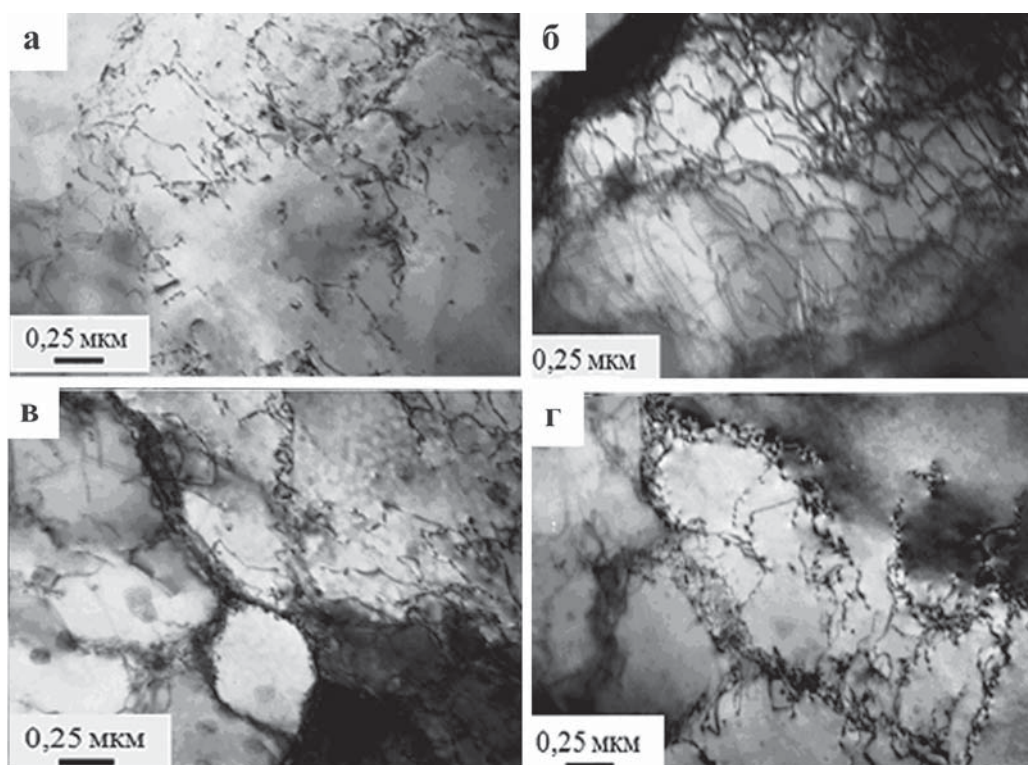


Рис. 6. Дислокационная субструктура образцов стали 30ХГСН2А после имплантации:
 а – структура дислокационного хаоса (исходный материал); б – дислокационные сетки после имплантации ионами меди или свинца; в – ячейки (имплантация по варианту II); г – фрагменты (имплантация по варианту V)

Таблица 5

Усталостная прочность стали 30ХГСН2А при имплантации ионов меди и свинца дозой 10^{17} ион/см²

	Сорт ионов				
	—	Cu	Pb	Cu; Pb	сплав: Cu 64% и Pb 36%
Вариант имплантирования	К	I	II	III	V
Число циклов до разрушения, N , кц	96,2	111,5	116,4	119,3	148

результаты показывают, что при имплантации одним видом ионов (медью или свинцом) наблюдается их повышенная концентрация на поверхности (табл. 6). При этом высокое содержание свинца объясняется большим радиусом и массой его ионов.

Последовательная имплантация двумя видами ионов (медью и свинцом) незначительно сказывается на концентрации меди в имплантированном слое. При этом содержание свинца существенно превосходит значение для случая имплантирования одним видом ионов – свинцом. Наибольшее значение (8,43 вес. %) кон-

центрация свинца достигает при имплантировании по варианту III.

Концентрация меди и свинца в имплантированном слое для варианта V, особенно меди, находится на уровне, близком к случаю имплантирования одного вида ионов. В то же время глубина проникновения ионов меди и свинца для данного варианта максимальна (см. рис. 5). Это явление, как предполагается, связано с повышением плотности генерируемых точечных дефектов в поверхностном слое стали 30ХГСН2А. Плотность генерируемых точечных дефектов в поверхностном слое стали 30ХГСН2А при одно-

Таблица 6

Содержание меди и свинца в поверхностном слое стали 30ХГСН2А при различных вариантах имплантации

Вариант имплантации	Сорт ионов	Содержание, вес. %	Сорт ионов	Содержание, вес. %
I	Cu	0,28	-	-
II	Pb	2,38	-	-
III	Cu	0,64	Pb	8,43
IV	Cu	0,43	Pb	3,21
V	Cu	0,45	Pb	0,36

Примечание: Доза имплантации каждого сорта ионов – 10^{17} ион/см².

временной имплантации ионами меди и свинца, а также при имплантации одних ионов свинца будет примерно одинаковой. Однако в первом случае аннигиляция части дефектов происходит не только посредством рекомбинации, диффузии к стокам (поверхности, границы зерен, дислокации и т.д.), но и за счет внедрения в дефекты ионов меди и формирования кластеров. Проникновение ионов меди в этом варианте имплантации облегчено за счет близости параметров их ионов к параметрам ионов железа.

По мере накопления точечных дефектов становятся существенными такие кооперативные процессы, как коалесценция дефектов с образованием микропор, вакансионных кластеров и дислокационных петель (см. рис. 6).

При ионной имплантации по варианту V в поверхностных слоях стали 30ХГСН2А создаются условия для формирования пересыщенных твердых растворов, а при определенных значениях флюенса ионов – выделениях новых фаз.

Полученные результаты позволяют предположить, что значения коэффициента трения должны быть наименьшими для образцов, имплантированных по вариантам I и V.

Коэффициент трения (связанного с трибологическими свойствами, главным образом, с износостойкостью) имплантированного слоя стали 30ХГСН2А измерялся при различных вариантах имплантации. Сравнительные испытания проводились на компьютеризированной установке для испытания на трение со схемой контакта «палец–диск» с коэффициентом взаимного перекрытия 0,015 без применения смазки. Контртело – диск, изготовленный из стали 30ХГСН2А, имело твердость 42 HRC и шероховатость поверхности 0,5 мкм.

В ходе испытаний контролировали значение момента трения и температуру контртела на расстоянии 1 мм от поверхности трения (температура поверхности контртела устанавливалась в процессе трения в результате саморазогрева).

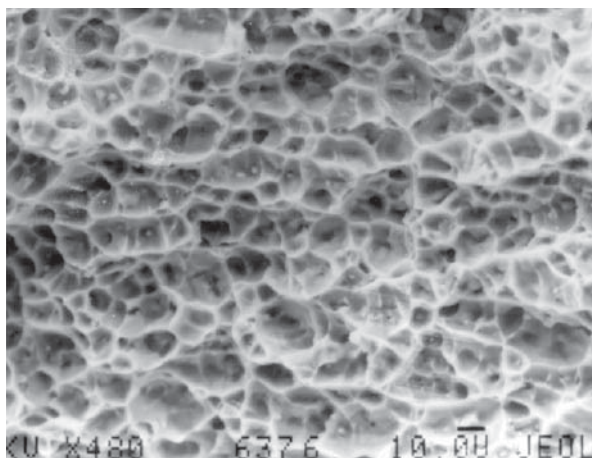


Рис. 7. Фрактограмма поверхности разрушения имплантированного образца стали 30ХГСН2А сплавом меди и свинца в зоне долома при усталостных испытаниях (x480)

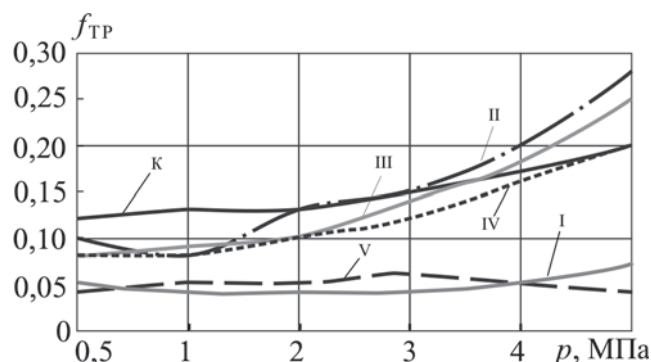


Рис. 8. Зависимость коэффициента трения имплантированных образцов стали 30ХГСН2А от величины удельного давления и варианта имплантации: K – контрольный (неимплантированный); I – медь; II – свинец; III – медь; затем свинец; IV – свинец, затем медь; V – сплав меди и свинца

Испытания проводились на скорости скольжения 3,25 м/с, задаваемой перед началом испытаний, и при ступенчатом повышении (шаг 1,0 МПа) в зоне трения удельных нагрузок от 0,5 до 5 МПа. Продолжительность работы на каждой ступени нагружения составляла не менее 30 мин после окончания процесса приработки, о чем можно судить по стабилизации момента трения и температуры. Далее нагрузку ступенчато снижали с шагом 1,0 МПа и продолжительностью работы на каждой ступени 15 мин. Значения коэффициентов трения испытанных образцов приведены на рис. 8.

Выполненные испытания позволяют сделать вывод: формирование имплантированного слоя, определяемое последовательностью имплантирования ионов меди и свинца, существенно влияет на коэффициент трения и, соответственно, на эксплуатационные свойства высоконагруженных шарнирных соединений машин и механизмов. Значения коэффициентов трения для стали 30ХГСН2А, имплантированной одновременно ионами меди и свинца (вариант V), приблизительно в 2 раза ниже, чем у неимплантированных образцов. Следовательно, износ пары трения с использованием в качестве материала элементов имплантированной стали 30ХГСН2А по варианту V будет меньше по сравнению с аналогичной парой трения из неимплантированных элементов. При давлении 3 МПа наблюдается схватывание имплантированных образцов по вариантам II, III и IV.

Заключение

На основе результатов выполненных исследований можно заключить, что одновременная имплантация ионов меди и свинца позволяет на 40–45% повысить усталость имплантированной стали 30ХГСН2А, что является, по-видимому, результатом увеличения глубины проникновения имплантируемых ионов и формирования дислокационных фрагментов. При одновременной имплантации ионов меди и свинца значение коэффициента трения стали 30ХГСН2А примерно в 2 раза ниже, чем у неимплантированных образцов.

Дальнейшие исследования следует направить на оптимизацию состава медно-свинцового

сплава для проведения имплантации, а также определение оптимальных значений флюенса имплантирования ионов и связь структуры имплантированного слоя со значением флюенса ионов.

Список литературы

1. Гусева М.И. Ионная имплантация в металлах // Поверхность. Физика, химия, механика. 1986. Т. 2. С. 27–34.
2. Владимиров Б.Г., Гусева М.И., Федоров А.В. и др. Исследование свойств ионно-имплантированных сталей // Поверхность. Физика, химия, механика. 1983. Т. 7. С. 123–129.
3. Комаров Ф.Ф. Ионная имплантация в металлы. – М.: Металлургия. 1990. – 216 с.
4. Быковский Ю.А., Неволин В.Н., Фоминский В.Ю. Ионная и лазерная имплантация металлических материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
5. Комаров Ф.Ф., Никифорова Л.Г. Ионно-лучевая модификация металлов. – Минск: БелНИИНТИ, 1990. – 64 с.
6. Овчинников В.В., Козлов Д.А., Якутина С.В. Исследование свойств поверхности стали 30ХГСН2А после имплантации ионами меди // Машиностроение и инженерное образование. 2009. № 2. С. 32–37.
7. Овчинников В.В., Козлов Д.А., Якутина С.В. Влияние ионной имплантации на износостойкость и антифрикционные свойства деталей из стали 30ХГСН2А // Материалы XI Междунар. науч.-практич. конф. «Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня». 2009 С. 219–226.
8. Васильева Е.В., Козлов Д.А., Овчинников В.В. Технологические процессы изготовления высоконагруженных деталей из стали 30ХГСН2А, работающих в условиях трения скольжения // Новые материалы и технологии – НМТ-2006. Материалы Всероссийской науч.-технич. конф. Москва, 21–23 ноября 2006. В 3-х томах. Т. 2. – М.: ИЦ МАТИ, 2006. С. 119–120.

Материал поступил в редакцию 14.08.2010

**ОВЧИННИКОВ
Виктор Васильевич**

Е-mail: vikov1956@mail.ru
Тел. +7 (499) 795-83-95

Доктор технических наук, профессор, академик Международной академии информатизации. Главный специалист по сварке и материаловедению ОАО «Российская самолетостроительная корпорация «МиГ». Область научных интересов – разработка новых алюминиевых сплавов и технологии изготовления из них ответственных сварных конструкций. Автор 275 научных работ, в том числе 96 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

**НЕМОВ
Алексей Сергеевич**

Е-mail: ssw11@mail.msiu.ru
Тел. +7 (495) 675-66-69

Кандидат физико-математических наук. Старший научный сотрудник НИО МГИУ. Область научных интересов – упрочнение поверхностных слоев потоками высоких энергий. Автор более 20 научных статей.

**КОЗЛОВ
Дмитрий
Александрович**

Е-mail: rae11@yandex.ru
Тел. +7 (495) 675-66-69

Кандидат технических наук. Младший научный сотрудник НИО МГИУ. Область научных интересов – материаловедение, применение методов электроискрового легирования и ионной имплантации для создания поверхностных слоев металлических сплавов с требуемыми свойствами. Автор 16 научных публикаций.

**ЯКУТИНА
Светлана Викторовна**

Е-mail: rae11@yandex.ru
Тел. +7 (495) 675-66-69

Ассистент кафедры «Материаловедение и технология конструкционных материалов» МГИУ. Область научных интересов – материаловедение, применение метода ионной имплантации для модифицирования трибологических и коррозионных свойств поверхностных слоев конструкционных материалов. Автор 8 научных публикаций.