

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ АЗОТИРОВАННЫХ СПЛАВОВ ЖЕЛЕЗА С РАЗНЫМИ ТИПАМИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ

© Лидия Ивановна Куксенова^{1,2}, Мария Сергеевна Алексеева^{3,1}

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

³Всесоюзный институт авиационных материалов, Москва, Россия

lkukc@mail.ru

Аннотация. Исследовали характерные особенности формирования износостойкой структуры азотированных модельных сплавов с ОЦК и ГЦК решетками: Fe-Mo, Fe-Cr, Fe-Al, Fe-Ni- Cr, Fe-Ni-Al, Fe-Ni-Ti, Fe-Ni-Cr-Al-Ti. Установлены взаимосвязи между параметрами структуры азотированного слоя и износостойкостью сплавов. Показано, что в сплавах с ОЦК решеткой матрицы максимальная износостойкость достигается при образовании некогерентных частиц нитридов легирующих элементов, а максимальная твердость соответствует сплаву с когерентными нитридами. В сплавах с ГЦК решеткой максимальные упрочнение при азотировании и износостойкость достигаются на стадии, предшествующей разрыву когерентной связи нитрида с матрицей. Взаимосвязи характеристик структуры азотированного слоя и износостойкости обсуждены с позиций формирования износостойкого структурного состояния сплавов.

Ключевые слова: стали, азотирование, структура износостойкость.

THE INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL STATE AND THE WEAR RESISTANCE OF NITRIDING IRON ALLOYS WITH DIFFERENT CRYSTAL LATTICE TYPE

© L.I. Kuksenova^{1,2}, M.S.Alekseeva^{3,1}

¹IMASH RAN, Moscow, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, Moscow, Russia

lkukc@mail.ru

Abstract. The typical peculiarity of wear resistant structure of nitriding model BCC and FCC alloys Fe-Mo, Fe-Cr, Fe-Al, Fe-Ni- Cr, Fe-Ni-Al, Fe-Ni-Ti, Fe-Ni-Cr-Al-Ti are investigated. The correlation between nitriding layer parameters and wear resistance of alloys are established. It is shown, that maximum wear resistance of BCC alloys is reached when non-coherent particles of alloying elements nitrides were formed, and maximum hardness corresponds to the alloy with coherent particles. For FCC alloys maximum hardness after nitriding and maximum wear resistance are reached at the stage before.

Keywords: steel, nitriding, structure, wear resistance.

1. Введение. В настоящее время повышение износостойкости конструкционных материалов за счет современных методов модифицирования поверхности изделий является одной из основных задач в проблеме надежности и долговечности машин и механизмов. Азотирование является одним из эффективных способов поверхностного модифицирования, повышающих твердость поверхностных слоев, износостойкость, усталостную и коррозионную стойкость, задиростойкость поверхностей деталей машин.

Известно, что сопротивление изнашиванию металлических материалов является структурно-чувствительной характеристикой [1,2]. Поэтому для технологического обеспечения процесса формирования износостойкой структуры при азотировании необходимой базой являются знания закономерностей между триботехническими характеристиками сопряжения и структурой поверхностного модифицированного слоя.

Целью данной работы является изучение характерных особенностей формирования износостойкой структуры азотированного слоя сплавов железа с ОЦК и ГЦК кристаллическими решетками, связанными с типом легирующих нитридообразующих элементов.

2. Материалы и методики проведения исследований. Исследовали специально выплавленные модельные сплавы с основой α - Fe (ОЦК решетка) состава (ат.%): Fe+4%Mo, Fe+(1-4%)Cr, Fe+4%Al и с основой γ - Fe (ГЦК решетка): Fe+29%Ni+4%Cr, Fe+29%Ni+4%Al, Fe+29%Ni+4%Ti; Fe+29%Ni+4%(Cr-Al-Ti). Содержание углерода было менее 0,05% (масс.), что позволило исключить влияние углерода на структуру диффузионной зоны при азотировании.

Образцы отжигали при 900°C, 2 ч и затем проводили газовое азотирование в среде диссоциированного аммиака в лабораторной муфельной печи с трехсекционными нагревателями, что позволяло поддерживать одинаковую температуру в разных частях пространства камеры. Сплавы с ОЦК решеткой азотировали в диапазоне температур 540-700°C, 35 ч.; сплавы с ГЦК решеткой при температурах 500-660°C, 80 ч.

Основой для выбора экспериментальных методик изучения структуры и свойств азотированных слоев являлся трибологический метод оценки качества поверхностных слоев [3]. Метод [3] предполагает оценивать микроскопические критерии материала приповерхностного микрообъема (физическое уширение рентгеновских линий, фазовый состав, размер упрочняющих частиц и т.п.) и макроскопические критерии пары трения в целом (уровень поверхностного разрушения (износостойкость), допустимые давления (стойкость к заеданию), коэффициент трения (фрикционность)). Микроскопические критерии выявляют структурное состояние материала поверхностного слоя, макроскопические – отражают механизм контактного взаимодействия, связанный с деформацией и разрушением слоев, а в совокупности виды критериев характеризуют качество поверхностного слоя с позиций трибологии.

Для оценки микроскопических критериев применяли рентгеноструктурный и электронномикроскопический методы. Электронномикроскопические исследования проводили на микроскопе TESLA BS-540 с ускоряющим напряжением 120 кВ в режимах микродефракции, темнопольного и светлопольного изображений. Определяли типоразмер нитридов, характер их связи с матрицей. Для оценки параметра структуры матрицы (α - или γ -Fe) проводили рентгеносъемки на дифрактометре ДРОН-4С в монохроматическом Co-K α излучении с компьютерной обработкой.

Среди макроскопических параметров определяли твердость по Виккерсу на приборе ТП по ГОСТ29999-59 при нагрузке 50 Н, микротвердость на приборе ПМТ-3 при нагрузке 1Н и

относительную износостойкость сплавов на машине однонаправленного трения скольжения модели Шкода-Савин. В качестве контртела использовали ролик из твердого сплава ВК20, практически неподверженный износу. Износ образца оценивали объемом лунки, образованной вращающимся стандартным роликом при заданном числе оборотов. Использовали ролик диаметром 30 мм и шириной 2,5 мм; давление на ролик 150Н, число оборотов - 675мин⁻¹. Эталонном служил образец сплава, не подвергнутый азотированию. Подробно методика испытаний описана в [4].

3. Результаты исследований и их обсуждение. Исследовали основные характеристики структуры и свойств азотированных при температуре 540°С двойных сплавов Fe-Mo, Fe-Cr, Fe-Al.

Для данных модельных сплавов уровень износостойкости согласуется с величиной твердости азотированного слоя, т.е. наблюдается прямая корреляция между твердостью и износостойкостью: чем выше твердость азотированного слоя, тем выше его относительная износостойкость. Кроме того, рентгеноструктурные исследования физического уширения интерференционной линии (220) α -фазы $\beta_{(220)}$ показали, что с увеличением твердости возрастает физическое уширение, что связано в основном с увеличением микродеформации кристаллической решетки. Следовательно, параметры $\beta_{(hkl)}$, HV и ε взаимосвязаны. Сплав, содержащий Fe+4%Mo, имеет минимальные значения $\beta_{(220)}=24$ мрад, твердости 5300 HV и износостойкости $\varepsilon=1,2$. Сплав Fe+4%Al имеет максимальные значения физического уширения, твердости и износостойкости: $\beta_{(220)}=37$ мрад, 9400 HV, $\varepsilon=2,2$.

Микродеформация кристаллической решетки α -фазы при выделении нитридов легирующих элементов зависит от разницы между удельными объемами кристаллических решеток азотированного феррита ($V_{уд}=0,0119$ нм³/ат) и нитридов легирующих элементов. Нитрид AlN имеет наибольший удельный объем ($V_{уд}=0,0177$ нм³/ат), что приводит к большей микродеформации α -фазы, характеризуемой физическим уширением $\beta_{(220)}$ [1].

Влияние количества легирующих элементов на взаимосвязь указанных параметров для сплавов Fe-Cr, содержащих от 1 до 4% Cr, отражает рис.1,а. Видно, что износостойкость при увеличении количества Cr до 4% монотонно возрастает от 0,5 до 1,8. Однако, наибольшее увеличение $\beta_{(220)}$ и твердости имеет место при содержании хрома до 1%: $\beta_{(220)}$ возрастает от 0 до 25 мрад, а твердость изменяется от 1250 до 6250 HV. При последующем увеличении Cr от 1% до 4% $\beta_{(220)}$ практически остается на том же уровне, а твердость несколько увеличивается (до 7200 HV).

Следует подчеркнуть, что и при каждой концентрации хрома в α -твердом растворе железа сохраняется общая закономерность для сплавов с ОЦК решеткой, выражающаяся в прямой корреляции параметров структуры $\beta_{(hkl)}$, характеристик механических свойств HV и относительной износостойкости ε . Однако, с увеличением концентрации нитридообразующего элемента степень роста этих параметров разная: при концентрации хрома до 1% $\beta_{(hkl)}$ возрастает в 24 раза, HV – в 5 раз, ε - в 2 раза; в диапазоне концентраций (1-4)%Cr наблюдается увеличение $\beta_{(hkl)}$ в 1,1 раза, HV – в 1,1 раза, ε - в 1,8 раза.

Такое изменение физического уширения интерференционной линии и твердости можно объяснить механизмами упрочнения диффузионной зоны в зависимости от количества легирующего элемента. В сплавах, содержащих 1-2% хрома, реализуется механизм упрочнения, рассмотренный в работах [1,5]. Он связан со значительной микродеформацией кристаллической решетки твердого раствора за счет образования когерентных зародышей нитридов легирующих элементов. При содержании хрома 1-2% энергия, необходимая для прохождения дислокаций через сильно искаженную область матрицы, будет тем больше, чем

выше микродеформация решетки вокруг частиц. При этом величина микродеформации кристаллической решетки зависит от размера нитридных частиц, удельного объема нитридов, соответствия решеток нитридов и матрицы. Экспериментально методом электронной микроскопии показано, что в сплаве Fe-Cr, содержащем 1% Cr, размер нитридных частиц составляет 1,3-1,5 нм, при 2% Cr – 2,5-3 нм, при 4% Cr – 4-5 нм. Более того, увеличение концентрации хрома приводит к образованию некогерентных нитридных частиц, которые будут являться препятствием движению дислокаций до тех пор, пока напряжение не станет достаточным для того, чтобы линия дислокации изогнулась и прошла между частицами. С увеличением размера частиц возрастает расстояние между ними [6], и в связи с этим требуется меньшее напряжение для прохождения дислокаций между частицами, в результате прирост твердости и физического уширения снижается, что и подтверждается концентрационными зависимостями HV и $\beta_{(hkl)}$. При таких условиях реализуется механизм упрочнения некогерентными частицами, предложенный Орованом [7]. Анализ полученных зависимостей дает основание предположить, что условия для деформации в случае постепенного изменения механизма перераспределения дислокационной структуры облегчаются, что является основной причиной формирования более износостойкой структуры и монотонного возрастания износостойкости во всем концентрационном диапазоне сплавов Fe-Cr (0-4%), в отличие от параметров HV и $\beta_{(hkl)}$.

Известно, что температура азотирования существенно влияет на структурное состояние поверхностного слоя. Поэтому в данной работе этот фактор анализировали на примере сплавов Fe-Cr (1 и 4%Cr) также с позиций условий формирования износостойкой структуры и выявления взаимосвязи между характеристиками структуры, твердостью и износостойкостью сплавов.

Результаты исследования физического уширения интерференционной линии (220) α -фазы $\beta_{(220)}$, твердости и износостойкости показали, что при увеличении температуры азотирования от 540 до 700°C, рис.1б, наблюдается более сложная зависимость между тремя исследуемыми величинами по сравнению с аналогичными зависимостями от концентрации легирующих элементов при постоянной температуре азотирования 540°C, рис.1а.

Так, при увеличении температуры азотирования наблюдается монотонное снижение физического уширения $\beta_{(220)}$ и микротвердости сплавов Fe+1%Cr и Fe+4%Cr. Для сплава, содержащего 1%Cr, $\beta_{(220)}$ снижается от 21 до 15 мрад, а микротвердость HV0,1- от 6600 до 3500 HV0,1, рис.1,б. Для сплава, содержащего 4% Cr, $\beta_{(220)}$ снижается от 33 до 14 мрад, а микротвердость - от 9200 до 5000, рис.1,в. Износостойкость при этом имеет максимум, который с увеличением количества хрома смещается в сторону более высоких температур азотирования: для сплава Fe+1%Cr максимум износостойкости соответствует температуре 620°C и составляет $\varepsilon=2,5$, а для сплава Fe+4% Cr - температуре азотирования 660°C и $\varepsilon=3$.

Результаты электронномикроскопических исследований сплавов с 1 и 4% Cr показали существенную разницу в микроскопической и дифракционной картинах сплавов с разным количеством хрома в зависимости от температуры азотирования. Толщина нитридов хрома в сплаве Fe+1%Cr ($t_{аз}=540^\circ$), определенная по микроэлектронограмме, составляет ~ 1,5 нм, в сплаве Fe+4%Cr при этой температуре образуются нитриды размером ~ 3-5 нм. Увеличение температуры до 620-660°C приводит к увеличению размеров нитридов в сплаве Fe+1%Cr до 8-10 нм, а в сплаве Fe+4%Cr - до 11-12 нм, и как отмечалось выше, расстояние между частицами растет, что в результате изменения движения дислокаций облегчает условия деформации при трении и как следствие, повышает износостойкость. Максимальная износостойкость для исследуемых сплавов наблюдается при формировании нитридов легирующих элементов с размером частиц ~ 10 нм, расстояние между которыми составляет

10-15 нм. Аналогичные закономерности наблюдались также при испытании перлитной азотированной стали 38X2МЮА [1,6].

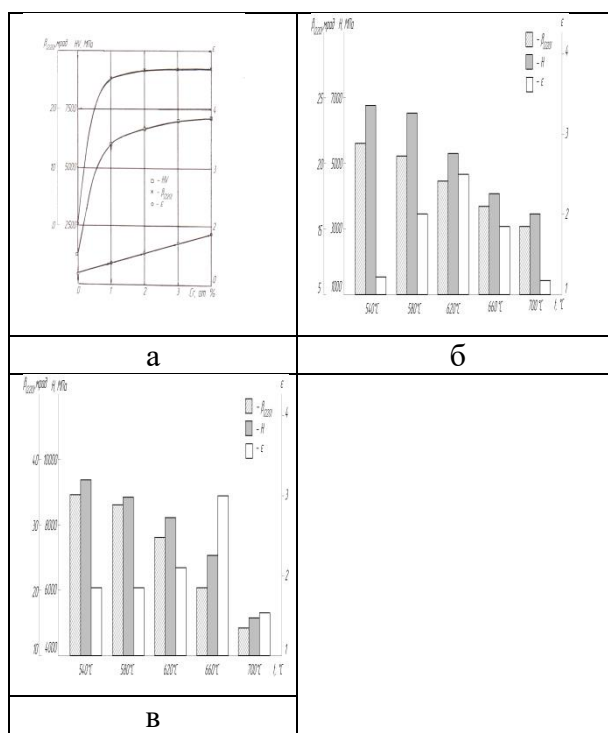


Рис.1. Влияние количества хрома при $t_{аз}=540^{\circ}\text{C}$ (а) и температуры азотирования сплавов Fe+1%Cr (б) и Fe+4%Cr (в) на физическое уширение интерференционной линии (220) α -фазы $\beta_{(220)}$, твердость HV и износостойкость ε .

Изменение типа решетки азотируемого сплава меняет механизм структурообразования диффузионной зоны [1]. Поэтому для оптимизации с позиций трибологии технологии азотирования сплавов, имеющих разные типы решетки, необходимым условием является знание характерных особенностей формирования износостойкой структуры в зависимости от состава сплава.

На рис.2,а показано влияние типа нитридообразующего элемента на взаимосвязь характеристик структуры и износостойкости диффузионных слоев сложнолегированных сплавов с аустенитной матрицей (Fe+29%Ni+X, где X=Al,Cr,Ti), азотированных при температуре 540°C. Видно, что структурное состояние матрицы, комплексно оцениваемое физическим уширением интерференционной линии (222) γ -фазы $\beta_{(222)}$, также зависит от типа легирующего элемента. Так, при легировании аустенита титаном наблюдается более значительное уширение ($\beta_{(222)}=50$ мрад) интерференционного максимума γ -фазы в азотированном слое, чем при легировании хромом ($\beta_{(222)}=35$ мрад). Минимальное изменение физического уширения происходит в азотированном слое сплава, легированного алюминием ($\beta_{(222)}=30$ мрад). Такое влияние нитридообразующих элементов на структурное состояние матрицы находится в соответствии с их воздействием на уровень твердости и износостойкости слоя, т.е. легирующие элементы, вызывающие большее физическое уширение интерференционной линии (222) γ -фазы $\beta_{(222)}$, обеспечивают более высокий уровень твердости и износостойкости азотированного слоя: для сплава с титаном HV=8400, $\varepsilon=1,5$; для сплава с алюминием HV=5600, $\varepsilon=0,9$. Аналогичная картина соответствия

физического уширения интерференционной линии (220) α -фазы, твердости и износостойкости наблюдалась для двойных сплавов с ОЦК кристаллической решеткой, легированных Mo, Cr, Al (табл.1).

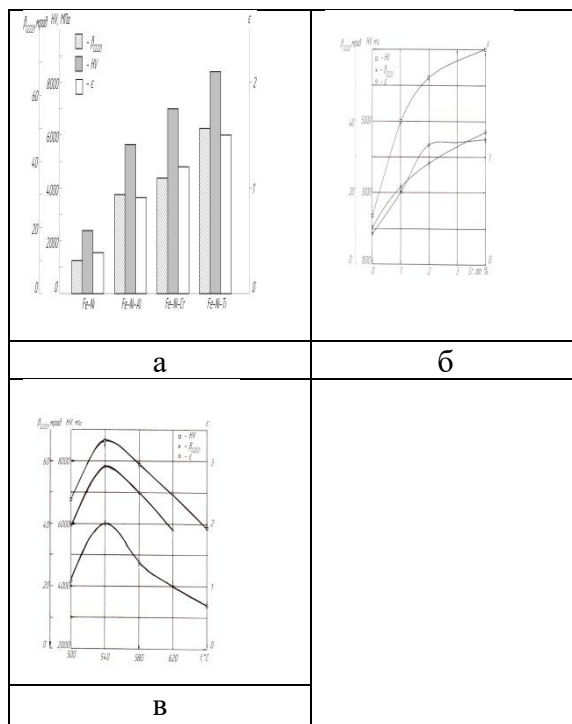


Рис.2. Влияние типа нитридообразующего элемента при $t_{аз}=540^\circ\text{C}$ (а), концентрации хрома при $t_{аз}=540^\circ\text{C}$ (б) и температуры азотирования (в) на твердость HV, физическое уширение интерференционной линии (222) γ -фазы $\beta_{(222)}$ и износостойкость ϵ аустенитного сплава Fe+29Ni+4%(Cr-Al-Ti)

Концентрация легирующего элемента также оказывает влияние на исследуемые параметры азотированного слоя (физическое уширение интерференционной линии $\beta_{(222)}$, твердость HV, износостойкость ϵ), рис.2,б. Резкое изменение $\beta_{(222)}$ и HV отмечается при увеличении содержания Cr до 2%, когда образуются зародыши нитридной фазы, когерентные матрице, и при этом реализуется механизм упрочнения за счет областей с максимальными микродеформациями [1]. Дислокации проходят через упруго деформированную матрицу, и зародыши фаз перерезаются. В диапазоне концентраций 2-4%Cr $\beta_{(222)}$ меняется незначительно, Наоборот, износостойкость исследуемых сплавов монотонно возрастает от 0,35 до 1,20 (в 3,4 раза) с увеличением концентрации хрома до 4%. Во всем концентрационном диапазоне значительно возрастает и твердость ($\approx 3,2$ раза), что, очевидно, связано с увеличением количества нитридов хрома. Анализ полученных данных в совокупности с экспериментальными результатами исследования структуры и износостойкости нержавеющей азотированной стали 12X18H10T [8] дают основание высказать предположение, что для сплавов с ГЦК решеткой монотонное повышение твердости и износостойкости исследуемых сплавов связано с количественными характеристиками нитридов хрома и особенностями формирования структурного состояния при азотировании сплавов с ГЦК решеткой. Экспериментальные значения $\beta_{(222)}$, HV, ϵ для

сложнолегированных сплавов с ГЦК матрицей в зависимости от типа легирующего элемента, рис.2,а, и температуры азотирования, рис.2,в а также данные [1] дают основания высказать некоторые представления об особенностях процессов структурообразования в диффузионной зоне сплавов на основе γ -Fe, которые отражаются на уровне износостойкости. Азотирование сплава Fe+29Ni+4%(Cr-Al-Ti) при $t_{аз}=500-720^{\circ}\text{C}$, определение параметров твердости HV и структурного состояния $\beta_{(222)}$ и последующие триботехнические испытания для всего диапазона температуры азотирования выявили общий характер изменения всех указанных параметров, рис.б: в отличие от сплавов на основе α -Fe, зависимости $\beta_{(222)}$, HV и ϵ от температуры азотирования для сплавов на основе γ -Fe изменяются по кривой с единым максимумом, который наблюдается для всех исследуемых величин при $t_{аз}=540^{\circ}\text{C}$, и составляет $\beta_{(222)}=55$ мрад, 8700 HV, $\epsilon=2$. Как показали результаты электронномикроскопического исследования, максимальный уровень износостойкости связан с высокой степенью упрочнения. При повышении температуры азотирования сплавов с ГЦК решеткой наблюдается понижение твердости и износостойкости.

Следовательно, особенность формирования структуры сплавов с γ -матрицей заключается в следующем. В комплекснолегированном сплаве, содержащем титан, хром, алюминий в суммарном количестве ~ 4 ат%, азотированном при низких температурах ($450-500^{\circ}\text{C}$), когда образуются зародыши нитридной фазы, когерентные матрице, основной причиной торможения дислокаций являются, также как в сталях с ферритной основой, поля упругих искажений вокруг нитридных сегрегаций. Однако, на этой стадии состав зародышей далек от состава стабильных нитридных фаз, и прочность таких частиц может быть низкой. Размер когерентных зародышей и расстояние между ними также малы. Поэтому при достижении определенной величины действующих напряжений, превышающей среднее напряжение поля упругих деформаций вокруг зародышей нитридных частиц, дислокации проходят через упруго деформированную матрицу, и зародыши нитридных фаз перерезаются. Повышение величины несоответствия периодов решеток матрицы и нитридов за счет постепенного изменения состава нитридных фаз при сохранении когерентности с матрицей приводит к росту энергии упругой деформации матрицы, что в свою очередь, увеличивает сопротивление движению дислокаций.

По мере изменения размера и состава нитридов, стремящегося к равновесному, прочность их возрастает, и тем труднее они перерезаются дислокациями. При достижении определенной величины несоответствия периодов решеток нитрида и матрицы, происходит частичное нарушение когерентности ($t_{аз}=\sim 500-550^{\circ}\text{C}$) для сплавов Fe+Ni+Ti, Fe+Ni+Cr, Fe+Ni+Cr+Al+Ti) [6]; сопротивление движению дислокаций и, следовательно, твердость возрастают, так как упругие искажения матрицы не уменьшаются при появлении полуккогерентной границы, а прочность нитридных частиц становится выше. Кроме того, возникающие дислокационные петли тоже вносят вклад в упрочнение. Следовательно, на стадии частичной когерентности твердость азотированного слоя аустенитных сталей постепенно возрастает. Этот процесс происходит вплоть до полного нарушения когерентности.

Образование некогерентной границы приводит к резкому снижению искажений на границе раздела частица-матрица, связанных с несоответствием решеток нитридной фазы и матрицы. Необходимо отметить, что в момент, предшествующий полному нарушению когерентности, плотность дислокаций несоответствия достигает максимального значения. В то же время состав и прочность нитридных частиц максимально приближаются к составу равновесных нитридных фаз. Тем не менее, происходит некоторое снижение сопротивления движению дислокаций и твердости слоя, так как исчезает такой фактор упрочнения, как поля упругих

искажений нитридных частиц, и он будет разным в зависимости от типа легирующего элемента.

Комплексно легированный сплав Fe+Ni+Cr+Al+Ti обладает суммарным эффектом от особенностей формирования структуры и свойств азотированного слоя, связанных с разными легирующими элементами, по-разному изменяющими структурное состояние и по-разному упрочняющими азотированный слой. Как следует из рис.2,а, из исследованных элементов наиболее эффективным упрочнителем является титан, затем следуют хром и алюминий. С помощью рентгеноструктурных исследований установлено, что при температурах азотирования, соответствующих образованию некогерентных нитридных фаз, периоды ГЦК решеток нитридов составляют: в сплавах Fe+Ni+Ti и Fe+Ni+Cr ($t_{аз}=580^{\circ}\text{C}$) - $\sim 0,42$ и $\sim 0,41$ нм соответственно, в сплаве Fe+Ni+Al ($t_{аз}=540^{\circ}\text{C}$) - $\sim 0,39$ нм [1]. Несоответствие периодов решеток нитридной фазы и матрицы в сплаве, легированном титаном, значительно больше, чем в остальных сплавах, поэтому образование нитрида титана создает максимальное искажение решетки матрицы. Плотность дислокаций несоответствия, накопленная к моменту нарушения когерентности, также будет максимальной в сплаве Fe+Ni+Ti. В сплаве Fe+Ni+Al несоответствие решеток нитридной фазы и матрицы имеет минимальное значение, следовательно, искажения матрицы в этом сплаве меньше, чем в остальных.

Прочностные характеристики слоя зависят и от прочности самих нитридных частиц. Нитрид титана является одним из самых твердых нитридов. Его твердость составляет ~ 20000 HV, твердость нитрида хрома 10000 [9].

Из вышеизложенного следует, что максимальное упрочнение при азотировании исследуемых сплавов можно ожидать на стадии, предшествующей полному образованию некогерентных нитридных частиц. Результаты экспериментальных исследований показали, что в сплавах Fe+Ni+Cr+Al+Ti такая стадия зафиксирована после азотирования при температуре $\sim 540^{\circ}\text{C}$, когда образуются мелкодисперсные комплексы нитридной фазы, частично когерентные матрице и достигается максимальное значение твердости диффузионной зоны, рис.2,в. Наблюдаемое при более высоких температурах азотирования уменьшение твердости слоя обусловлено нарушением когерентности решеток нитридной фазы и матрицы.

Таким образом, для сложнoleгированных сплавов на основе ГЦК решетки железа формирование структуры и свойств диффузионной зоны при газовом азотировании зависит от нескольких факторов, существование которых связано с разными легирующими элементами: Ni, Cr, Al, Ti. Это прежде всего уровень микродеформации кристаллической решетки матрицы, размеры нитридов и расстояние между ними, несоответствие параметров решеток матрицы и упрочняющих фаз, прочностные характеристики нитридов, степень когерентности с матрицей, механизмы перераспределения дислокаций в процессе упрочнения при азотировании и деформации при триботехнических испытаниях. Каждый из этих факторов влияет на уровень износостойкости, но степень и направление этого влияния определяется как природой легирующего элемента, так и температурой азотирования, оптимальное значение которой с позиций трибологии разное. Дальнейшие исследования по выявлению вклада каждого элемента позволяют открыть новые резервы повышения износостойкости поверхностных азотированных слоев путем оптимизации режимов технологии азотирования с позиций трибологии. Из приведенных выше результатов, на данном этапе исследования, можно лишь сделать вывод, что для анализируемых сложнoleгированных сплавов увеличение твердости при азотировании аустенитных сталей создает более износостойкие структурные состояния в отличие от перлитных сталей, для которых твердость не является однозначным критерием износостойкости.

4. Заключение. Для исследованных составов сплавов с α - и γ -основами установлены соответствия между физическим уширением интерференционных линий матрицы, твердостью азотированного слоя и относительной износостойкостью в диапазоне температур азотирования 500-700⁰С. Рассмотрены механизмы структурообразования диффузионной зоны в зависимости от типа решетки и концентрации легирующего элемента. Установлено, что мероприятия, приводящие к увеличению твердости азотированного слоя аустенитных сталей, позволяют создавать более износостойкие поверхностные слои.

Список литературы

- [1] Герасимов С.А. Научные основы разработки технологических процессов азотирования конструкционных легированных сталей, обеспечивающих повышение работоспособности изнашивающихся сопряжений машин. Дисс. докт. техн. наук.- М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана, 1997 - 563с.
- [2] Любарский И.М., Палатник Л.С. Металлофизика трения. - М.: Металлургия, 1976. - 176с.
- [3] Куксенова Л.И., Рыбакова Л.М. Рентгеноструктурный и триботехнический методы контроля качества антифрикционных покрытий // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 1999. - № 1. - С.19-24.
- [4] Куксенова Л.И., Мичугина М.С. Влияние условий нагрева при азотировании на структуру и износостойкость поверхностных слоев на стали 38Х2МЮА // МиТОМ. - 2008. - № 2. - С.29-34.
- [5] Золотаревский В.С. Механические испытания и свойства металлов. - М.: Металлургия, 1974. - 304с.
- [6] Мичугина М.С. Разработка структурного состояния азотированного слоя конструкционных сталей, ответственного за их износостойкость. Автореферат дисс. канд. техн. наук. - М.: ИМЕТ им.А.А.Байкова, 2008. - 16с.
- [7] Orowan E. Symposium on internal stresses in metals and alloys. – London: Institute of Metals, 1948. – 47 p.
- [8] Герасимов С.А., Гресс М.А., Лаптева В.Г., Мухин Г.Г., Баязитова В.В. Сопротивление изнашиванию газобарических азотированных слоев на стали 12Х18Н10Т // МиТОМ. - 2008.- № 2. - С.34-37.
- [9] Лахтин Ю.М., Силина Н.В. Природа высокой твердости легированного феррита после азотирования // МиТОМ. - 1977. - № 6. - С. 23-31.

Дата поступления: 18 сентября 2019 г.