

УДК 621.785.51

В. Н. Симонов, М. В. Унчикова,
Ю. П. Шкретов, А. В. Велищанский

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА ПЛАСТИЧНОСТЬ ДИФфуЗИОННЫХ ХРОМОАЛИТИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ

Исследовано влияние импульсного электромагнитного поля различной мощности на динамическую пластичность диффузионных хромоалитированных покрытий, полученных газоциркуляционным способом на литейном никелевом жаропрочном сплаве ЖС26У. Экспериментально установлены оптимальные технологические режимы для повышения пластичности и представлена модель влияния магнитного воздействия на строение межфазных границ в покрытии.

E-mail: unchikova_mv@mail.ru

Ключевые слова: магнито-импульсная обработка, структура межфазных границ, долговечность диффузионных покрытий.

Повышение эксплуатационных свойств широкой номенклатуры деталей авиационного двигателестроения достигается за счет применения прогрессивных методов поверхностной обработки. Широко используемым способом увеличения долговечности высокотемпературных деталей является нанесение на поверхность деталей жаростойких хромоалитированных покрытий, которые для обеспечения заданного ресурса работы конструкций должны иметь определенные физико-химические и механические свойства. Одним из важнейших механических свойств является пластичность, определяющая сопротивление образованию и росту трещин, в том числе и при циклическом термомеханическом воздействии. Традиционный способ увеличения пластичности покрытий заключается в оптимизации его толщины, а также химического и фазового составов. Однако требования к структуре покрытия для достижения необходимой пластичности и стойкости к воздействию агрессивной газовой среды имеют, как правило, противоположный характер. В связи с этим в области химико-термической обработки все большее внимание уделяется разработке новых методов улучшения свойств покрытий при термическом, термомеханическом и других воздействиях. В настоящей работе исследуется влияние магнито-импульсной обработки (МИО) [1] на пластичность хромоалитированных диффузионных покрытий.

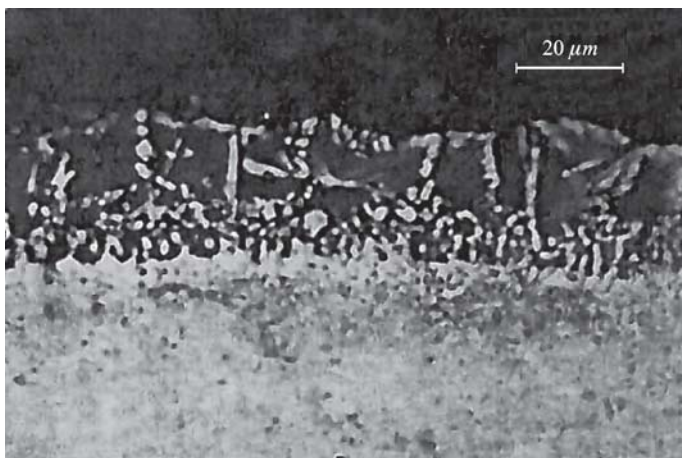


Рис. 1. Микроструктура хромоалитированного покрытия. $\times 500$

Исследования проводились на цилиндрических образцах диаметром 14 мм и высотой 20 мм из литейного никелевого жаропрочного сплава ЖС26У. Хромоалитирование газоциркуляционным методом [1] по режиму $t = 1000^\circ\text{C}$, $\tau = 4$ ч выполнялось с использованием галоидного активатора NiCl_2 и лигатуры в виде гранулированного сплава состава 50 % Cr–50 % Al. После диффузионного насыщения проводилась термовакуумная обработка (ТВО) при температуре 1210°C в течение 75 мин.

Согласно микроскопическим исследованиям, покрытие имеет слоистую структуру (рис. 1). Внешняя зона состоит преимущественно из моноалюминида никеля NiAl с прожилками фазы Ni_3Al по границам зерен, внутренняя зона имеет гетерофазную структуру. Толщина покрытия составляет 40...45 мкм.

Динамическая пластичность покрытий оценивалась по работе зарождения и развития трещин (A), определяемой по специальной методике, разработанной в ВВИА имени Н.Е. Жуковского. В местах удара бойка-индентора, падающего с высоты h , покрытие деформировалось и растрескивалось. Суммарная длина образующихся трещин (l_Σ) определялась с помощью микроскопа МИМ-7 ($\times 170$). Работа зарождения и развития трещины A рассчитывалась по формуле

$$A = \frac{E}{l_\Sigma},$$

где $E = mgh$ — потенциальная энергия бойка массой m .

Для определения влияния МИО на динамическую пластичность проведены две серии экспериментов. В предварительных испытаниях магнитная обработка выполнялась с соблюдением следующих режимов: 1) $H=10^4$ А/м, $n=1$; 2) $H=10^5$ А/м, $n=1$; 3) $H=10^7$ А/м, $n=10$ (где H — напряженность магнитного поля, n — число импульсов).

Результаты исследований представлены в таблице и на рис. 2. Зависимость работы разрушения покрытия от напряженности магнитного поля имеет экстремальный характер. Оптимальный результат — максимальная работа зарождения и развития трещины — получен при $H = 10^5$ А/м, а увеличение напряженности магнитного поля до 10^7 А/м приводит к появлению в покрытии вторичных трещин и снижению значений параметра A . Таким образом, на основе проведенных исследований установлено, что положительное влияние МИО на свойства покрытия проявляется при напряженности магнитного поля $10^3 \dots 10^6$ А/м. Именно этот диапазон значений H использовался при составлении расширенной матрицы планирования экспериментов. Кроме того, во второй серии экспериментов было изучено влияние нагрева образца перед магнитным воздействием на пластичность покрытия. Температура нагрева составляла 500 или 1000 °С, время выдержки — 20 мин.

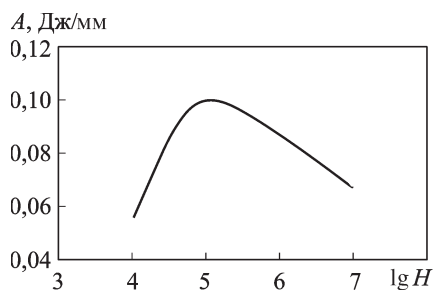


Рис. 2. Зависимость работы зарождения и развития трещин от напряженности магнитного поля при МИО

Таблица

Результаты испытания образцов на динамическую пластичность

H , А/м	Номер испытания	Число трещин	Суммарная длина трещин, мм	Среднее значение суммарной длины трещин, мм	A , Дж/мм
10^4	1	14	3,189	2,8343	0,05532
	2	18	2,057		
	3	19	3,257		
10^5	1	15	1,257	1,573	0,09968
	2	25	2,96		
	3	8	0,503		
10^7	1	25	4	2,3313	0,0672586
	2	12	1,4629		
	3	25	1,531		

Зависимость работы зарождения и роста трещин от режимов термической и магнитной обработки покрытий приведена на рис. 3. Отметим, что максимальные значения параметра A , соответствующие наибольшей энергоемкости процесса разрушения покрытий, смещаются в сторону уменьшения напряженности магнитного поля при возрастании температуры обработки. Экстремальные значения параметра A достигаются при $H = 10^3$ А/м, если температура нагрева составляет 1000 °С; при $H = 10^{3,5}$ А/м, если температура нагрева 500 °С и при $H = 10^4$ А/м, если нагрев отсутствует.

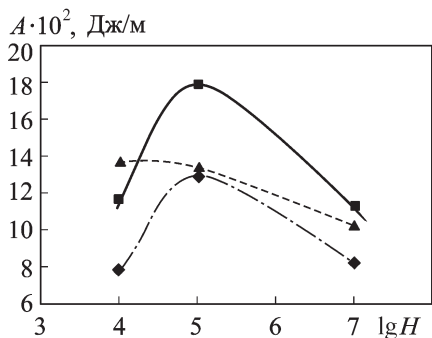


Рис. 3. Зависимость работы зарождения и роста трещин в хромоалитированном покрытии от напряженности магнитного поля и температуры предварительного нагрева:

◆ — без предварительного нагрева; ■ — 500 °C; ▲ — 1000 °C

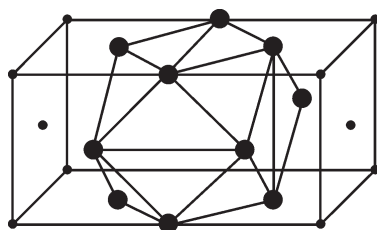


Рис. 4. Архимедов кубооктаэдр (первая координационная сфера ГЦК решетки)

Оптимальным режимом обработки для повышения динамической пластичности хромоалитированных покрытий является нагрев до 500 °C с выдержкой 20 мин и МИО при $H = 10^4$ А/м.

Положительное влияние МИО на динамическую пластичность жаростойких покрытий на никелевых сплавах, вероятно, объясняется воздействием на структуру границ зерен наружного слоя покрытия, так как размер зерна, фазовый состав и твердость покрытия, согласно проведенным исследованиям, не изменяются. С помощью теории координационных полиэдров была построена приближенная модель границы двух фаз NiAl и Ni₃Al, образующихся при диффузионном насыщении сплава и последующей ТВО.

Упорядоченная фаза Ni₃Al имеет ГЦК решетку типа Cu₃Au, т.е. атомы Ni лежат в центре грани куба (позиция типа 0,1/2,1/2), а атомы Al — в вершинах куба (позиция типа 0,0,0). Первая координационная сфера любого атома ГЦК решетки представляет собой кубооктаэдр (12 вершин) (рис. 4), который выделяется между двумя соседними элементарными ячейками и имеет 8 треугольных граней типа {111} и 6 квадратных граней типа {100}. Поскольку в фазе Ni₃Al присутствует два вида атомов, то возможны два способа размещения атомов в вершинах кубооктаэдра, очерченного вокруг атомов Ni и Al соответственно.

Вращением треугольных граней вокруг их нормалей на угол 22,24° кубооктаэдр превращается в икосаэдр, совпадающий с полиэдром Франка–Каспера с числом вершин Z12. Это преобразование, хорошо известное в математике, впервые было использовано для описания мартенситного превращения [3]. После поворота квадратные грани {100} становятся ромбическими, затем переламываются по коротким диагоналям ромба, превращаясь в две треугольные грани.

В соответствии с двумя вариантами заселения вершин исходного кубооктаэдра атомами Ni и Al конечная икосаэдрическая конфигурация также имеет два варианта заселения вершин.

Аналогичные преобразования первой координационной сферы могут быть выполнены для фазы NiAl. Упорядоченная фаза NiAl имеет ОЦК решетку типа CsCl. В этой структуре атомы Ni и Al заселяют вершины двух примитивных кубических решеток, вставленных одна в другую с вектором относительного смещения решеток $1/2, 1/2, 1/2$. Соответственно атомы одного сорта заселяют вершины куба $0,0,0$, тогда атомы другого сорта заселяют вершины $1/2, 1/2, 1/2$, т.е. центры элементарных кубов. Первая координационная сфера любого атома ОЦК решетки представляет собой ромбододекаэдр (14 вершин), который преобразуется в полиэдр Франка–Каспера с координационным числом Z14. Превращение сопровождается изломом ромбических граней с образованием двух треугольных граней.

Известен вариант сплетения полиэдров Франка–Каспера Z12 и Z14 в единую кубическую структуру. Это так называемая структура A15 (структурный тип Cr₃Si). Ее можно представить как трехмерную шахматную доску, где роль черных кубов играют полиэдры Z12, а роль белых кубов — полиэдры Z14. Соседство двух полиэдров Z14 с общей гранью порождает полиэдр Z12 без добавления новых вершин, а соседство двух полиэдров Z12 с общим ребром порождает полиэдр Z14 также без добавления новых атомов. Структура A15 является переходной конфигурацией между ОЦК и ГЦК решетками. Косвенным подтверждением возможности реализации реконструкции кубооктаэдра в икосаэдр можно считать структуру β -модификации марганца. В кубической структуре β -марганца можно выделить икосаэдрические координационные полиэдры, которые искажены таким образом, что двугранные углы между двумя парами треугольных граней меньше, чем у остальных граней. В результате эти пары образуют почти плоские квадратные грани, ориентированные по трем взаимно перпендикулярным осям. Этот икосаэдр как бы наполовину превратился в кубооктаэдр.

В области ОЦК решетки полиэдры Франка–Каспера с треугольными гранями трансформируются в полиэдры частного вида с квадратными гранями, что экспериментально наблюдается во многих сплавах. В NiAl наблюдаются отдельные кластеры такой фазы, которая называется ω -фазой. За кластерами ω -фазы идет ОЦК решетка.

Таким образом, переход от одной структуры к другой происходит через слой ошибок (рис. 5). Модель позволяет определять пространственное расположение атомов и их конфигурации в граничном слое. Очевидно, что устойчивость такой конфигурации граничного слоя будет зависеть от порядка заселения вершин атомами разного сорта. Само расположение атомов может изменяться в результате термического

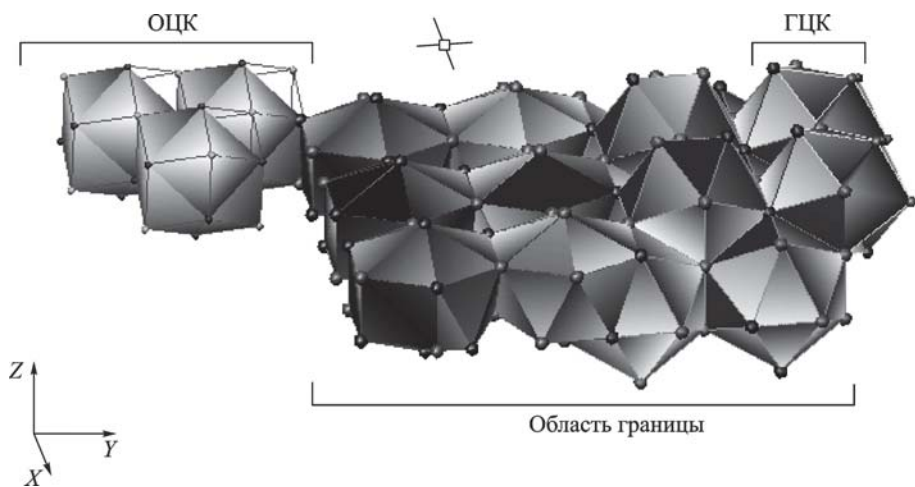


Рис. 5. Модель строения межфазной границы

и электромагнитного воздействий. Можно предположить, что высокотемпературный отжиг нарушает упорядоченный характер заселения вершин, а МИО способствует упорядоченному заселению вершин.

В слое дефектов было обнаружено повышенное число атомов никеля. В отличие от алюминия никель является ферромагнетиком и при воздействии магнитного импульса группируется в определенный слой, формируя собственное магнитное поле. Образование ориентированных магнитных моментов электронов снижает энергию межатомных связей, что должно повышать пластичность. Можно также предположить, что положительное влияние скопления атомов никеля на пластичность реализуется через магнитострикцию. Магнитострикция Ni отрицательная, это приводит к созданию сжимающих напряжений на границе и, как следствие, к увеличению энергоемкости процесса разрушения покрытия.

Таким образом, проведенные исследования позволили определить оптимальный режим МИО в целях повышения динамической пластичности хромоалитированных покрытий. Экспериментально установлено, что предварительный нагрев до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 20 мин и МИО при $H = 10^4\text{ А/м}$ увеличивают работу разрушения покрытия до максимального значения $0,18\text{ Дж/мкм}$. Положительное влияние МИО на пластичность покрытий объясняется изменением структуры межфазных границ NiAl-Ni₃Al покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы / Ю.В. Баранов, О.А. Троицкий, Ю.С. Авраамов и др. – М.: МГИУ, 2001. – 844 с.

2. Ц и р к у л я ц и о н н ы й метод получения диффузионных покрытий на деталях газотурбинных двигателей и перспективы его развития / Б.Н. Арзамасов, А.К. Белявский, А.В. Логунов и др. // Вестник машиностроения. – 1991. – № 11. – С. 43–48.
3. К р а п о ш и н В. С., Т а л и с А. Л., П а н к о в а М. Н. Политопный топологический подход к описанию мартенситного превращения // МиТОМ. – 1999. – № 8. – С. 23–28.

Статья поступила в редакцию 17.09.2008

Виктор Николаевич Симонов родился в 1944 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1968 г. Д-р техн. наук, доцент кафедры “Материаловедение” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 75 научных работ в области химико-термической обработки.

V.N. Simonov (b. 1944) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1968. D. Sc. (Eng.), assoc. professor of “Science of Materials” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 75 publications in the field of chemical-temperature processing.

Марина Васильевна Унчикова окончила МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1980 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Материаловедение” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ в области термической и химико-термической обработки металлов и сплавов.

M.V. Unchikova graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1980. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Science of Materials” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 30 publications in the field of temperature and chemical-temperature processing of metals and alloys.

Юрий Павлович Шкретов родился в 1941 г., окончил МАТИ в 1966 г. Начальник отдела УГМЕТ ФГУП ММП “Салют”. Автор 30 научных работ в области защитных покрытий

Yu.P. Shkretov (b. 1941) graduated from the Moscow Aviation and Technological Institute in 1966. Head of department of the Federal State Unitary Enterprise “ММП “Salyut”. Author of 30 publications in the field of protective coatings.

Александр Владимирович Велищанский (1938–2010), окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1961 г. Канд. техн. наук, доц. кафедры “Материаловедение” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ в области химико-термической обработки.

A.V. Velishchanskii (b. 1938) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1961. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Science of Materials” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 30 publications in the field of chemical-temperature processing.