

Материаловедение

УДК 621.9.016

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАНЕСЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ДЕФОРМИРУЕМЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

В.С. Муратов, Н.В. Трефилова, Л.В. Журавель

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: muratov@sstu.smr.ru

Исследованы различные варианты деформационно-термического упрочнения деформируемых сплавов алюминия с целью получения высококачественных ионно-плазменных декоративных покрытий различной цветовой гаммы. Ионно-плазменные декоративные покрытия из нитрида титана наносили на изделия из сплавов систем Al-Cu-Mg, Al-Mg, полученные резанием и обработкой давлением. Реализованы различные схемы подстуживания и деформирования образцов. На основе проведенных исследований установлены варианты и параметры деформационной и термической обработки сплавов, обеспечивающие наилучшие показатели качества ионно-плазменных покрытий. Качество покрытий оценивали по толщине покрытия, его пористости, адгезии, однородности цветовой гаммы.

Ключевые слова: деформируемые сплавы алюминия, деформация, термическая обработка, ионно-плазменные покрытия.

Из многочисленных методов нанесения защитных покрытий наиболее широко применяются вакуумно-плазменные и плазмохимические, которые позволяют получать покрытия из разнообразных материалов с высокой адгезией к подложке, износостойкостью, твердостью, коррозионной стойкостью и другими свойствами. Одним из таких методов является вакуумно-дуговое напыление, которое применяется главным образом для увеличения износостойкости изделий, но также с большим успехом применимо и в качестве декоративного покрытия.

Для деформируемых алюминиевых сплавов наиболее важными с точки зрения получения качественных покрытий являются вопросы структурной однородности поверхности и ее шероховатости. Первое обеспечивает однородность свойств покрытий по поверхности изделия, а минимальная шероховатость – адгезионную прочность, стойкость при окислении и абразивном износе. Вместе с тем при одинаковых значениях шероховатости микрогеометрия поверхности после таких финишных операций, как шлифование и полирование, будет зависеть от ее твердости. При механической обработке при низкой твердости поверхности

Владимир Сергеевич Муратов (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Материаловедение и товарная экспертиза».

Леонид Васильевич Журавель (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Материаловедение и товарная экспертиза».

Наталья Владимировна Трефилова, аспирант.

доля процессов срезания микровыступов будет меньше, чем доля их пластической деформации. Соответственно, будет происходить загиб микровыступов от пластической деформации, а не их срезание. При загибе микровыступов под ними остаются различные загрязнения даже после тщательной очистки поверхности перед нанесением покрытий. Это объясняет снижение качества ионно-плазменных покрытий и наличие микродуг на поверхности после их нанесения. Негативный эффект еще более усиливается при структурной поверхностной неоднородности сплавов алюминия, вызванной легированием несколькими элементами. В этой связи при нанесении декоративных ионно-плазменных покрытий на деформируемые алюминиевые сплавы важными являются вопросы обеспечения однородности структуры поверхности сплавов и повышения ее твердости. Это может быть решено с помощью подбора режимов деформирования изделий, а также за счет их термического упрочнения.

Пластическая деформация алюминиевых сплавов является не только формообразующим, но и структурообразующим способом обработки [1–3]. Метод индентирования является важным методом исследования упругопластических свойств материалов на всех уровнях ниже макроскопического. В литературе [4] описана возможность определения различных прочностных характеристик материала путем обработки экспериментальных диаграмм вдавливания.

Для исследования использовались образцы сплавов 1160, АМг8 в виде пластин толщиной 5 мм. Образцы нагревались в электрической печи до температуры 500 °С и затем локально деформировались стальным коническим индентором. При этом реализованы различные схемы подстуживания и деформирования образцов. Схемы отличались друг от друга как скоростью охлаждения после деформации, так и длительностью подстуживания до и после деформации. Изменялось также и направление измерения твердости на образцах (варьировался угол θ) (рис. 1). Твердость определяли по методу Виккерса при нагрузке 50 Н. После измерения твердости в деформированном состоянии образцы подвергались термической обработке: закалке с различным временем выдержки и естественному старению.

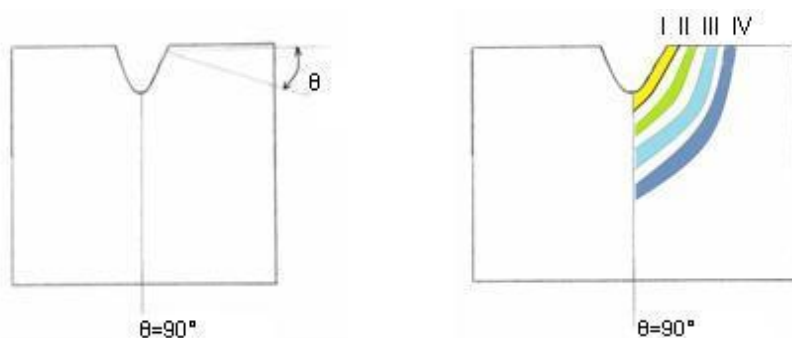


Рис. 1. Направления измерения твердости Рис. 2. Зоны деформационного воздействия

Относительно области внедрения индентора выделим четыре зоны его деформационного воздействия (рис. 2):

- зона I на расстоянии 0 мм (прилегающая к поверхности области внедрения индентора) – зона максимальной деформации;
- зона II на расстоянии 5 мм от поверхности области внедрения индентора – зона промежуточного деформационного воздействия;

- зона III на расстоянии 10 мм от поверхности области внедрения индентора – зона минимального деформационного воздействия;
- зона IV на расстоянии 15 мм – зона отсутствия деформационного воздействия.

Проведенное выделение зон основано на полученном в работе [4] распределении эквивалентной пластической деформации в материале при внедрении конического индентора.

В табл. 1 и 2 приведены результаты определения твердости образцов после деформирования индентором.

Таблица 1

Распределение твердости в образце без термической обработки с охлаждением после деформации на воздухе, МПа

Расстояние от зоны внедрения индентора, мм	Время подстуживания до деформации, с	Направление θ , град				
		0	15	40	55	90
0	0	1050	1100	1120	1100	1250
	5	1000	1000	1000	900	950
	25	900	850	1000	900	900
5	0	950	1070	1117	1112	1200
	5	966	966	1033	775	766
	25	900	975	950	895	1125
10	0	937	1025	1162	1125	1080
	5	850	942	950	862	912
	25	904	900	950	890	962
15	0	926	987	960	950	1000
	5	973	950	917	850	962
	25	926	900	910	875	920

Таблица 2

Распределение твердости в образце без термической обработки с охлаждением после деформации в воде, МПа

Расстояние от зоны внедрения индентора, мм	Время подстуживания, с	Направление θ , град				
		0	15	40	55	90
0	0	1100	1150	1350	1400	1300
	5	1100	1100	1100	1000	1000
	10	1000/970	900/750	900/800	1100/850	1200/950
	60	-/1300	-/1150	-/1300	-/1310	-/1300
5	0	1160	1087	1312	1370	1220
	5	1010	1036	1056	950	940
	10	1080/915	975/937	987/916	920/910	1150/1116
	60	-/1300	-/1233	-/1300	-/1166	-/1200
10	0	1166	1200	1350	1333	1232
	5	867	952	970	916	982
	10	1077/857	937/1110	1005/1140	930/925	1012/962

Расстояние от зоны внедрения индентора, мм	Время подстуживания, с	Направление θ , град				
		0	15	40	55	90
	60	-/1150	-/1250	-/1250	-/1283	-/1250
15	0	–	1050	1325	1300	–
	5	1025	1052	990	1077	1013
	10	1115/883	1012/–	1062/–	930/–	1137/900
	60	-/1137	–	-/1266	-/1162	-/1100

Примечание: в числителе – подстуживание на воздухе проводилось до деформации; в знаменателе – подстуживание на воздухе проводилось после деформации.

Из анализа полученных данных, представленных в табл. 1, установлено следующее. В случае, когда термическая обработка образцов отсутствует, охлаждение после деформации на воздухе без подстуживания позволяет получить в I зоне деформационного воздействия твердость выше, чем в IV зоне (на 110 – 250 МПа), при этом максимальная твердость наблюдается при $\theta = 90$ градусов (1250 МПа). Также выявлено влияние подстуживания в отсутствие термической обработки: эффект упрочнения от деформации снижается при времени подстуживания 5 сек до 30 – 80 МПа, а при $\theta = 90$ градусов – до 0. При времени подстуживания, равном 25 сек, упрочнение от деформации при большинстве θ отсутствует.

При отсутствии термической обработки с охлаждением образца после деформации в воде (табл. 2), выявлено, что твердость в I зоне по сравнению с IV выше на 25 – 100 МПа, при этом максимально высокие значения зафиксированы при $\theta = 55 – 90$ градусов.

Твердость в I зоне также возросла по сравнению с охлаждением на воздухе на 50 – 300 МПа, максимальное значение наблюдается при $\theta = 55 – 90$ градусах.

При введении подстуживания после деформации на воздухе перед охлаждением в воде замечено, что в I зоне при времени подстуживания 10 сек твердость снижается на 30 – 250 МПа, причем максимальное снижение установлено при $\theta = 55 – 90$ градусов в сравнении с подстуживанием до деформации. При этом в IV зоне при времени подстуживания 10 сек твердость снижается на 232 – 237 МПа при сравнении с подстуживанием до деформации. При увеличении времени подстуживания до 60 сек твердость либо не изменяется, либо незначительно снижается (I зона при сравнении с отсутствием подстуживания и $\theta = 15 – 90$ градусов).

Если анализировать промежуточные зоны деформационного воздействия II и III, то при охлаждении после деформации на воздухе при отсутствии подстуживания во второй зоне твердость выше при сравнении с IV зоной на величину до ~ 200 МПа. Максимально высокое значение наблюдается при $\theta = 90$ градусов (1200 МПа). При рассмотрении III зоны в сравнении с IV твердость выше на величину до 175 МПа, при этом наибольшие значения прироста установлены при $\theta = 40 – 90$ градусов (175 МПа).

При введении в данный режим подстуживания до деформации установлено, что при времени подстуживания 5 сек прирост твердости снижается до ~ 100 МПа ($\theta = 40^\circ$), а при $\theta = 55 – 90$ градусов твердость становится даже ниже, чем в сплаве без деформации. При времени подстуживания 25 сек прирост твердости уменьшается до 40 МПа.

В случае охлаждения образцов после деформации в воде твердость во второй зоне возрастает на 17 – 250 МПа, при этом твердость в третьей зоне также может

увеличиться на ~ 200 МПа. При добавлении подстуживания после деформации на воздухе перед охлаждением в воде во второй зоне при времени подстуживания 10 сек твердость снижается на 10 – 165 МПа. Максимально низкое значение наблюдается при $\theta = 0$ градусов по сравнению с подстуживанием до деформации. В III зоне при времени подстуживания 10 сек твердость снижается на 5 – 200 МПа, а максимально низкое значение твердости установлено при $\theta = 0$ градусов по сравнению с подстуживанием до деформации. При времени подстуживания 60 сек (III зона) твердость либо практически не изменяется, либо снижается не столь значительно.

При термообработке деформированных индентором образцов установлено, что в IV зоне с увеличением времени закалки с 5 до 25 мин твердость растет при охлаждении как на воздухе, так и в воде.

При рассмотрении влияния термообработки на I зону выявлено, что при режиме без подстуживания при охлаждении на воздухе с увеличением времени закалки с 5 до 25 мин твердость увеличивается на 50 – 80 МПа, кроме $\theta = 90$ градусов. При охлаждении в воде при увеличении времени закалки с 5 до 25 мин твердость возрастает на 20 – 150 МПа, кроме $\theta = 40 - 90$ градусов.

В результате пластической деформации индентором (сплав АМг8) происходит дробление зерен (рис. 3), возникает их ориентированный характер. При пластической деформации происходит зарождение дислокаций и их перемещение по плоскостям скольжения. При этом образуется дислокационная ячеистая структура с высокой плотностью дислокаций. Именно за счет высокой плотности дислокаций и реализуется повышенная твердость исследованных сплавов.

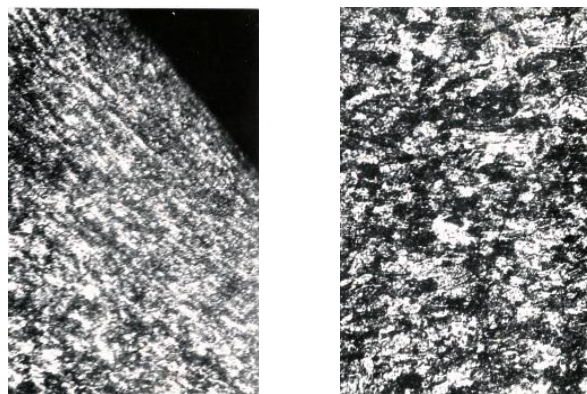


Рис. 3. Микроструктура сплава АМг 8 (x200):
а – в зоне I; б – в зоне IV

Измерения микротвердости сплава АМг8 показали, что наибольшая твердость наблюдается в зоне I и составляет 1100 МПа при охлаждении образца в воде. Во II и III зонах значения микротвердости одинаковы ~ 900 МПа. При охлаждении образца на воздухе в I зоне максимальное значение микротвердости составило 1050 МПа, а во II и III зонах выявлено значение микротвердости порядка 1000 МПа. В зоне отсутствия деформационного воздействия микротвердость составляет 860 МПа для охлаждения на воздухе и 950 МПа для охлаждения в воде.

Установлено формирование макро- и микронапряжений в зонах деформации образцов, значения которых представлены в табл. 3.

Таким образом, твердость сплава 1160 может варьироваться в достаточно широких пределах в зависимости от режимов деформационно-термической обработки. Это подтверждается и исследованиями сплава АМг8. В связи с этим следует ожидать, что различный уровень твердости создает неидентичные условия шлифования и полирования поверхности, что предопределяет разброс и по качеству ионно-плазменных покрытий. В качестве приемов, обеспечивающих повышенный уровень твердости, могут использоваться: интенсивная пластическая деформация, ускоренное охлаждение после деформации, отсутствие подстуживания до и после деформирования, термическая обработка с определенными временными параметрами, установленными с учетом предшествующей деформационной обработки.

Дополнительно исследовано влияние различных вариантов термической обработки сплава 1160 на твердость, шероховатость поверхности и параметры наносимых покрытий из нитрида титана.

Таблица 3

Макро- и микронапряжения в образцах сплава АМг 8

Состояние материала	Плоскость отражения	Угол отражения рентгеновских лучей, θ	Макронапряжения σ_1 , МПа	Ширина линии, В, мм	Микронапряжения σ_2 , МПа
После отжига	(311)	46,825		11	
Зоны деформации (I и II, $\theta=90^\circ$) при охлаждении на воздухе	(311)	46,725	344	13	186
После отжига	222	49,600		11	
Зоны деформации (I и II, $\theta=90^\circ$) при охлаждении в воде	222	49,450	468	13	168

Проанализированы варианты термической обработки: свежезакаленное состояние; закалка + старение; кратные закали + старение. При этом исследованы варианты с естественным и искусственным старением. Оптимальный вариант и параметры термической обработки устанавливали из условия получения минимальной шероховатости и максимальной твердости поверхности. Шероховатость поверхности определяли на профилометре с цифровым отсчетом и индуктивным преобразователем модели 296. После термической обработки и полирования поверхности образцов микротвердость поверхности измеряли на приборе ПМТ-3 с нагрузкой 0,49 Н.

В качестве оптимальных вариантов термической обработки установлены: 4-кратная закалка при 490–500 °С + искусственное старение при 115 °С в течение 150 мин; 3-кратная закалка + естественное старение в течение 4 суток. Эти варианты обеспечивают одинаковые и наибольшие значения микротвердости (1100 МПа) и минимальную шероховатость ($Ra = 0,08 - 0,1$ мкм).

Нанесение ионно-плазменных покрытий выполнялось на модернизированной вакуумной установке ННВ-6.6 И1 по методу КИБ. Перед нанесением покрытий образцы подвергались ультразвуковой очистке в моющем водном растворе и в бензине БР-1 с последующей сушкой и протиркой спиртом. После нагрева в

сушильном шкафу до температуры 150–200 °С в течение 10 мин образцы помещались в вакуумную камеру.

Для сравнения оценивали состояние покрытия TiN, нанесенного на образцы без их термической обработки (в состоянии поставки). Покрытие имело большое количество следов микродуг при практически том же уровне остальных параметров.

Это позволяет рекомендовать предложенные режимы термической обработки деформируемых алюминиевых сплавов систем Al–Cu–Mg и Al–Mg для получения качественных декоративных ионно-плазменных покрытий на изделиях из этих сплавов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ширинкина И.Г., Петрова А.Н., Бродова И.Г., Пилюгин В.П., Антонова О.В. Фазовые и структурные превращения в алюминиевом сплаве АМц при разных методах интенсивной пластической деформации // Физика металлов и металловедение. – 2012. – Т. 113. – № 2. – С. 181-186.
2. Муратов В.С., Морозова Е.А., Дворова Н.В., Закопец О.И. Совершенствование технологий получения литых и деформируемых заготовок из алюминиевых сплавов // Матер. 4-й Всероссийской научно-технической конф. – Самара, 2012. – С. 237-243.
3. Муратов В.С., Дворова Н.В., Хамин О.Н. Влияние структурного состояния деформируемых сплавов алюминия на качество ионно-плазменных покрытий // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов. – Магнитогорск, 2012. – С. 179-180.
4. Смирнов С.В., Экземплярова Е.О. Влияние радиуса скругления вершины индентора на напряженно-деформированное состояние при внедрении индентора в упругопластический материал // Физическая мезомеханика. – 2009. – № 6. – С. 73-78.

Статья поступила в редакцию 13 января 2014 г.

PROVIDING HIGH-QUALITY APPLICATION OF ION-PLASMA COATINGS ON WROUGHT ALUMINUM ALLOYS

V.S. Muratov, N.V. Trefilova, L.V. Guravel

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

In work various variants of thermal hardening of deformable alloys of aluminium with the purpose of reception of high-quality ionic-plasma decorative coverings of various color scale were investigated. Ion plasma decorative coverings from nitride of the titan put on products from alloys of systems Al-Cu-Mg, Al-Mg, received by cutting and processing by pressure. Implemented various schemes podstuzhivaniya and deformation patterns. On the basis of the lead researches it is established variants and parameters of thermal processing of the alloys providing the best parameters of quality of ionic-plasma coverings. Quality of coverings estimated on thickness of a covering, its porosity, adhesion, uniformity of color scale.

Keywords: *deformable alloys of aluminium, deformation, heat treatment, ionic-plasma coverings.*

Vladimir S. Muratov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Nataliya V. Trefilova, Postgraduate Student.

Leonid V. Guravel (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.