

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ И ТВЕРДОСТИ ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМ AL-SI И AL-SI-CU НА КАЧЕСТВО ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

В.С. Муратов, О.Н. Хамин, О.И. Закопец

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

E-mail: muratov@sstu.smr.ru

Исследовано качество ионно-плазменных покрытий, наносимых на отливки из алюминиевых сплавов. Проанализированы причины низкого качества покрытий на сплавах, содержащих кремний. Показано, что форсирование охлаждения на стадии кристаллизации сплава и после ее завершения, а также выбор соответствующих режимов термической обработки позволяют достигнуть надлежащего уровня качества покрытий.

***Ключевые слова:** ионно-плазменные покрытия, отливки, алюминиевые сплавы, условия кристаллизации, термическая обработка, структура, твердость.*

Ионно-плазменная технология нанесения покрытий методом конденсации ионной бомбардировкой (КИБ) весьма перспективна для декорирования отливок из алюминиевых сплавов. Применение получили покрытия из нитрида титана, качественно имитирующие позолоту. Изменяя режимы КИБ, можно обеспечить полное сходство с золотом различных видов и проб. При этом покрытия отличаются высокой прочностью сцепления с поверхностью изделия и повышенной износостойкостью.

Реализация метода КИБ предусматривает очень жесткие требования к качеству поверхности изделий. Прежде всего, это отсутствие посторонних загрязнений (ржавчины, масла, других неметаллических материалов). Особые трудности возникают при нанесении покрытий на отливки, поверхность которых может содержать различные дефекты (поры, шлаковые включения, окисленные трещины).

При нанесении ионно-плазменных покрытий (ИПП) на алюминиевые сплавы поверхность отливок должна иметь определенную структуру и свойства, также определяющие качество их поверхности с точки зрения получения покрытий. Показатели качества поверхности классифицируются на физико-химические и геометрические. К физико-химическим показателям относятся: химический состав, микроструктура, поверхностное напряжение, электродный потенциал, твердость, микротвердость, адгезия, электрические, магнитные и оптические свойства. К основным геометрическим показателям поверхности относятся: макрогеометрия, волнистость, шероховатость, субмикрощероховатость. Качество ИПП на алюминиевых сплавах оценивается, в свою очередь, следующими показателями: толщина, пористость, микротвердость, адгезионная прочность, стойкость при окислении и абразивном износе. Для декоративных покрытий важна также однородность цветовой гаммы по всей поверхности изделия.

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

Олег Николаевич Хамин (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Материаловедение и товарная экспертиза».

Оксана Игоревна Закопец, аспирант.

В представленной работе исследовано качество поверхности отливок из сплавов АК12 (система легирования Al-Si), АК5М2, АК9М2 (система легирования Al-Si-Cu) и АМ6 (система легирования Al-Cu), полученных с использованием метода литья под давлением. Метод литья под давлением зарекомендовал себя как наиболее экономически оправданный в условиях серийного производства и обеспечивающий наилучшие показатели качества поверхности отливок (при прочих равных условиях) перед нанесением ИПП.

Реализована следующая маршрутная технология: получение отливок литьем под давлением; галтовка отливок; предварительное полирование поверхности отливок; финишное полирование поверхности.

Использована литейная машина для литья цветных металлов и сплавов модели 711А07. Галтовку производили на специализированной центробежно-инерционной установке. Применена схема сухой галтовки с наполнителями из пластмассовых шариков и древесных опилок. Варьировались основные параметры галтовки: частота вращения барабанов с отливками n , об./мин.; длительность галтовки t , мин. Установлены оптимальные значения параметров галтовки: $n = 170$ об./мин; $t = 40$ мин. Предварительное и финишное полирование поверхности отливок производили на двухскоростной полировальной установке ВПУ-7000. При предварительном полировании: число оборотов полировального круга $V_1 = 3000$ об./мин; длительность полирования 5 мин. При финишном полировании: $V_2 = 7000$ об./мин; длительность полирования 5 мин.

По мере прохождения этапов технологии измеряли шероховатость поверхности на профилометре с цифровым отсчетом и индуктивным преобразователем модели 296. Шероховатость поверхности после галтовки отливок составила соответственно 0,75; 0,65; 0,7 и 0,6 мкм для указанных выше сплавов. У сплавов первых двух систем (Al-Si, Al-Si-Cu) на поверхности наблюдались более темные, чем основная поверхность, зоны. Затем отливки полировали до шероховатости $Ra = 0,06$ мкм.

Перед нанесением покрытий отливки 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 30 минут отливки помещались в вакуумную камеру.

Нанесение ИПП выполнялось на модернизированной вакуумной установке ННВ-6.6 И1 по методу КИБ. В качестве декоративного покрытия наносили титан (имитация хромового и никелевого покрытий) и нитрид титана (имитация золотого цвета).

Толщина ИПП нитрида титана составила 1,5 мкм, пористость для указанных сплавов соответственно 6, 4, 5 и 2 пор на кв. мм. Установлен одинаковый уровень адгезии покрытия на разных сплавах.

На отливках из сплавов первых двух систем (Al-Si и Al-Si-Cu) цвет ИПП оказался неоднородным: имеются темные матовые участки, а также видны четкие светлые участки. На рис. 1 и 2 представлены образцы после нанесения ИПП.

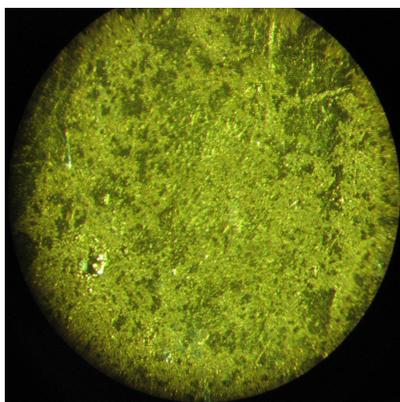
Неоднородность цвета существенно ухудшает товарный вид изделия с ИПП. На отливках из сплава АМ6 цвет покрытия был однородным по всей поверхности.

Повышенная пористость и явная неоднородность цвета ИПП, по нашему мнению, связаны с наличием на поверхности сплавов первых двух систем зон эвтектики (α -фаза + кремний), и они тем значительнее, чем большее содержание кремния в сплаве. Можно предположить для кремнийсодержащих сплавов алюминия, что при прохождении стадий полирования и последующей ионной очистке поверхности отливок в вакуумной камере произошло разрушение и «растравливание» более хруп-

ких зон эвтектики. В результате в этих зонах изменились такие характеристики поверхности, как шероховатость, электродный потенциал, поверхностные напряжения. Отмеченное создало неодинаковое состояние поверхности отливок при конденсации ИПП. В результате образовалась «пятнистость» поверхности с чередованием матовых (более темных) и светлых участков покрытий, что делает товарный вид изделий с ИПП неприемлемым.



a

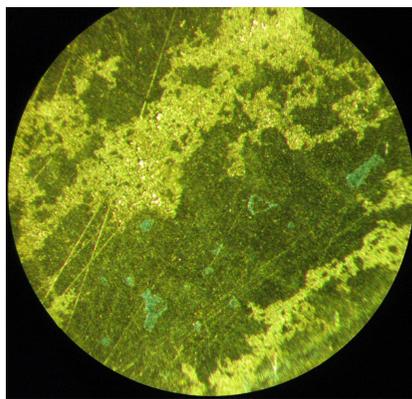


б

Рис. 1. Сплав АК9М2: *a* – общий вид; *б* – $\times 60$



a



б

Рис. 2. Сплав АК5М2: *a* – общий вид; *б* – $\times 60$

В работах [1-3] показано, что микрогеометрия поверхности после операций шлифования и полирования зависит от ее твердости. Наличие загибов микровыступов на поверхности при низкой твердости приводит к скопленению под ними загрязнений даже при тщательной очистке поверхности перед нанесением ИПП, что снижает параметры их качества. Качество ИПП на сплавах системы Al-Si, Al-Si-Cu может быть улучшено за счет измельчения и повышения равномерности кремнийсодержащей эвтектики, а также при увеличении твердости поверхности.

С целью проверки этого исследовано влияние особенностей заполнения формы, скорости охлаждения при кристаллизации и после ее завершения, режимов термической обработки на структуру и свойства литых алюминиевых сплавов АК9 (система легирования Al-Si), АК6М2, АК10М2Н (система легирования Al-Si-Cu).

Скорости кристаллизационного и послекристаллизационного охлаждения в типовой технологии определяются следующими температурно-временными парамет-

рами: заливка расплава с температурой 720-730 °С в металлическую форму (температура формы 250-270 °С); кристаллизация в форме и охлаждение в ней до температуры 250-300 °С; извлечение отливки из формы и охлаждение в контейнерах в течение 2-4 часов до 50 °С или изолированно друг от друга на конвейере (охлаждение на воздухе). При этом скорость охлаждения отливок в процессе кристаллизации достигает значений 300-800 °С/мин, а после ее завершения – от 1-5 °С/мин до 10-20 °С/мин.

Исследуемые варианты охлаждения отливок предусматривают следующие изменения: время выдержки в форме после заливки $\tau_{\text{ф}}$ либо устанавливается по действующей технологии, либо сокращается в два раза, а после извлечения из формы реализуется охлаждение отливок в воде.

Установлено, что для отливок из сплава АК6М2 длительность кристаллизации ($\tau_{\text{кр}}$) составляет 1,3 мин, $\tau_{\text{ф}}$ по технологии 3,8 мин; для отливок из сплава АК9 – $\tau_{\text{кр}}=1,6$ мин, $\tau_{\text{ф}}=2,8$ мин; из сплава АК10М2Н – $\tau_{\text{кр}}=0,8$ мин, $\tau_{\text{ф}}=1,2$ мин. Если $\tau_{\text{ф}}=3,8$ мин, то температура отливки перед извлечением составляет 250 °С, при $\tau_{\text{ф}}=1,9$ мин – 500-520 °С. Результаты оценки размеров дендритной ячейки приведены в таблице.

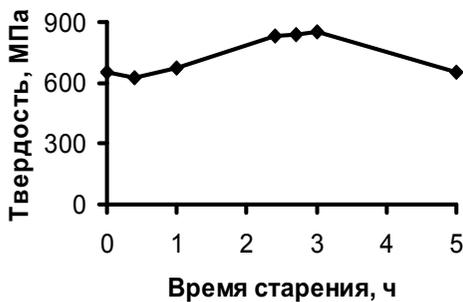
Размер дендритной ячейки в исследуемых сплавах

Сплав	$\tau_{\text{кр}}$, мин	$\tau_{\text{ф}}$, мин	Охлаждение	Размер дендритных ячеек, мкм
АК6М2	1,3	3,8	В контейнере	40 – 44
		3,8	В воде	36 – 39
		1,9	В воде	32 – 34
АК9	1,6	2,8	В контейнере	31 – 35
		2,8	В воде	27 – 30
		1,4	В воде	24 – 26
АК10М2Н	0,8	1,2	В контейнере	32 – 35
		1,2	В воде	25 – 27

Из данных таблицы видно, что к измельчению дендритной структуры приводит повышение температуры начала ускоренного охлаждения и увеличение скорости послекристаллизационного охлаждения. Ускоренное охлаждение в воде обеспечивает и более высокие механические свойства: для сплава АК6М2 при охлаждении в воде $\sigma_{\text{в}}=220-240$ МПа, $\delta=1,4-2,0$ %, а при охлаждении в контейнере $\sigma_{\text{в}}=197$ МПа, $\delta=0,8-1,1$ %. Твердость в различных участках отливки составляет в случае охлаждения в контейнере от 710 до 740 МПа, при форсированном охлаждении – от 740 до 800 МПа.

Эффект измельчения структуры и прироста свойств существенно зависит от температуры извлечения отливки из формы. Чем выше температура отливки перед началом охлаждения, тем дисперснее структура и выше свойства в литом состоянии.

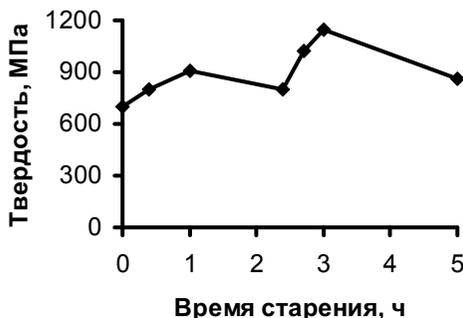
Исследованиями [4-6] установлено, что отливки из сплавов систем Al-Si-Cu и Al-Si-Mg, форсированно охлажденные с высоких температур после кристаллизации, имеют не только наиболее высокие свойства после окончательной термообработки – закалки и старения, но и сам процесс распада пересыщенного твердого раствора протекает значительно быстрее. При вариантах обработки с сокращенным в два раза $\tau_{\text{ф}}$ и форсированным охлаждением в воде после извлечения из формы прирост твердости в процессе старения протекает интенсивно с первых минут и через 60 минут твердость достигает предельной величины. Отливки, полученные по типовому режиму, достигают наибольшую твердость лишь через 2 часа.



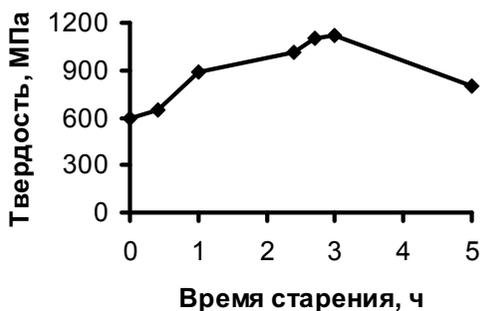
a



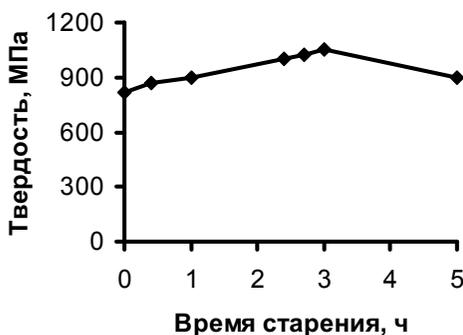
б



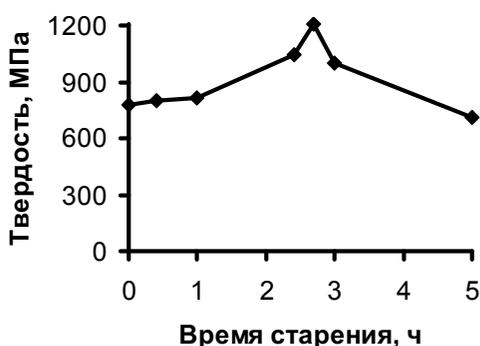
в



г



д



е

Рис. 3. Кинетика изменения твердости при старении:

a – обычное охлаждение, 10 с; *б* – форсированное охлаждение, 10 с;
в – обычное охлаждение, 1 мин; *г* – форсированное охлаждение, 1 мин;
д – обычное охлаждение, 5 мин; *е* – форсированное охлаждение, 5 мин

Известно, что кинетика процесса старения и изменения твердости алюминиевых сплавов определяется степенью неравновесности исходной закаленной структуры. Для установления влияния условий охлаждения при кристаллизации, температуры нагрева и выдержки при закалке на кинетику изменения твердости при искусственном старении реализован дополнительный эксперимент. Использованы образцы, вырезанные из форсированно охлажденных отливок и отливок, подвергнутых обычному охлаждению на воздухе. Нагрев сплава под закалку осуществлялся следующим образом: образцы (сплав АК6М2) загружались в печь с температурой 550 °С (темпе-

ратура закалки сплава – 515 °С) и по контактной термопаре проводился контроль за температурой поверхности образца. После достижения поверхностью температуры 515 °С образцы выдерживались (Δt_3) в печи от 10 секунд до 10 минут, что позволяло получать различную степень насыщенности твердого раствора и концентрацию вакансий. При увеличении выдержки происходит рост обоих параметров структуры и увеличение степени неравновесности структуры сплава перед операцией старения. На рис. 3 показано, как изменяется твердость сплава при изменении длительности старения и состояния сплава перед старением. Твердость сплава определялась по методу Виккерса при нагрузке 50 Н. На каждую экспериментальную точку производилось пять замеров. Среднеквадратичное отклонение измерений составляло 15-18 МПа.

Анализ результатов показывает, что твердость сплава в процессе старения меняется немонотонно. Наиболее это характерно для режима с малым Δt_3 . При увеличении длительности старения при форсированном охлаждении установлено пять стадий снижения и увеличения твердости. Их наличие обусловлено протекающими процессами зонного распада, перехода от зонного к фазовому распаду, преобладания фазового распада коагуляции. Получение высокой твердости сплава имеет место лишь при Δt_3 не менее 1 мин; лишь такая выдержка обеспечивает необходимую пересыщенность твердого раствора после закалки.

Применение форсированного охлаждения отливок позволяет получить наиболее высокую твердость сплава, причем при сокращении длительности старения по сравнению с режимом охлаждения на воздухе. Так, форсированное охлаждение обеспечивает твердость сплава 1210 МПа при $\tau_c=2,7$ ч, а обычное охлаждение на воздухе позволяет достигать твердости 1150 МПа при $\tau_c=3$ ч.

Состояние сплава с повышенными однородностью структуры и твердостью создает условия для эффективного равномерного шлифования и полирования поверхности отливки как подготовительных операций к нанесению ИПП. Это, в свою очередь, позволяет получать ИПП из нитрида титана на отливках из сплавов, содержащих кремний, без явной «пятнистости» поверхности.

Выводы

1. Формирование качественных ионно-плазменных покрытий из нитрида титана методом конденсации ионной бомбардировкой на поверхности отливок из кремнийсодержащих алюминиевых сплавов затрудняется получением «пятнистой» (неоднородной по цвету) поверхности. Это объясняется несоответствием показателей качества состояния поверхности после шлифования, полирования и ионной очистки необходимому уровню требований.

2. Для отливок из сплава системы Al-Cu при использовании традиционных методов получения отливок и предлагаемых режимов нанесения покрытий установлено отсутствие «пятнистой» поверхности.

3. Предложено использование форсированных кристаллизационного и послекристаллизационного охлаждений отливок с одновременным сокращением времени старения для измельчения дендритной структуры и повышения твердости сплавов систем легирования Al-Si и Al-Si-Cu. Получаемое после подготовительных операций состояние поверхности позволяет наносить покрытия без явной «пятнистости».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Муратов В.С., Хамин О.Н., Дворова Н.В. Влияние упрочнения деформируемых алюминиевых сплавов на качество ионно-плазменных покрытий // Технологии упрочнения, нанесения покры-

- тий и ремонта: Матер. 14-й межд. научно-практич. конф. – Санкт-Петербург, 2012. – Ч. 2. – С. 155-159.
2. Дворова Н.В. Выбор режимов термообработки деформируемых алюминиевых сплавов, обеспечивающих нанесение качественных вакуумных ионно-плазменных покрытий // Будущее машиностроения России: Тр. 5-й Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – С. 99-101.
 3. Дворова Н.В., Законец О.И., Морозова Е.А., Муратов В.С., Хамин О.Н. Получение качественных ионно-плазменных покрытий и предшествующая обработка алюминиевых сплавов // Международный журнал экспериментального образования. – 2012. – № 5. – С. 56.
 4. Муратов В.С., Дворова Н.В., Морозова Е.А. Формирование свойств алюминиевых сплавов при старении // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2011. – № 5. – С. 61.
 5. Муратов В.С., Дворова Н.В., Морозова Е.А. Условия кристаллизации и старение алюминиевых сплавов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2011. – № 5. – С. 43.
 6. Муратов В.С., Морозова Е.А., Законец О.И. Структура и свойства форсированно охлажденного после кристаллизации литейного сплава Al-Si-Mg // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2012. – № 4. – С. 82.

Статья поступила в редакцию 5 февраля 2013 г.

INFLUENCE OF STRUCTURE AND HARDNESS OF CAST ALUMINUM ALLOYS AL-SI AND AL-SI-CU SYSTEMS ON THE QUALITY OF ION-PLASMA COATINGS

V.S. Muratov, O.N. Khamin, O.I. Zakopets

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

The paper deals with the problem related to the quality of ion-plasma coatings applied to the casting of aluminum alloys. The reasons of low quality coatings on alloys containing silicon are analyzed. It has been detected that forced cooling at crystallization phase and after it as well as the choice of the mode of heat treatment make it possible to achieve the appropriate level of coating quality.

Keywords: *ion-plasma coatings, castings, aluminum alloys, crystallization conditions, heat treatment, structure, hardness.*

*Vladimir S. Muratov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Oleg N. Khamin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Oksana I. Zakopets, Postgraduate Student.*