

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НИТРИДА ТИТАНА НА ОТЛИВКАХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Муратов В.С.¹, Хамин О.Н.¹, Закопец О.И.¹

¹ ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет», Самара, Россия (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244), e-mail: muratov@sstu.smr.ru

Исследовано качество ионно-плазменных покрытий, нанесенных на изделия из литейных алюминиевых сплавов систем легирования Al-Si и Al-Si-Cu. Оценивались параметры покрытий: шероховатость, толщина, пористость, адгезия, внешний вид. На отливках из кремнийсодержащих сплавов формируется покрытие с неоднородной окраской. Это связано с наличием на поверхности сплавов зон эвтектики (α -фаза+Si). С целью решения данной проблемы было исследовано влияние особенностей заполнения формы расплавом, скорости охлаждения в процессе и после кристаллизации, режимов термической обработки на структуру и свойства литейных алюминиевых сплавов. На основе исследований установлены варианты и параметры тепловой обработки сплавов, обеспечивающие наилучшие показатели качества покрытий. Увеличенные скорости охлаждения и сокращенная длительность старения приводят к измельчению структуры и обеспечению более высоких механических свойств. Качество ионно-плазменных покрытий улучшается за счет измельчения кремнийсодержащей эвтектики и увеличения твердости, что повышает эффективность проведения операций подготовки поверхности под нанесение покрытия.

Ключевые слова: декоративные покрытия, нитрид титана, алюминиевые сплавы, отливки, однородность цветовой гаммы, твердость, структура, термическая обработка.

METHODS TO IMPROVEMENT QUALITY OF WEAR RESISTANT ION-PLASMA TITANIUM NITRIDE COATINGS ON ALUMINIUM ALLOYS CASTINGS

Muratov V.S.¹, Khamin O.N.¹, Zakopets O.I.¹

¹Samara State Technical University, Samara, Russia (443100, Samara, street Molodogvardeyskaya, 244), e-mail: muratov@sstu.smr.ru

Quality of ion-plasma coatings applied on aluminum casting alloys Al-Si and Al-Si-Cu alloying systems is investigated. Characteristics of coatings as surface finish, thickness, pore volume, adhesion, face were evaluated. On the casting containing silicium coating is formed with non-uniform color. This is due to eutectic area on alloys surface (α -phase + Si). To solve this problem influence features form filling melt, cooling rate during and after crystallization, conditions heat treatment on structure and properties casting aluminum alloys were investigated. Based on research variants and characteristics alloys heat treatment providing the best quality coatings are established. Increased cooling rates and decreased age time result to a structure refinement and ensure high mechanical properties. Quality of ion-plasma coatings improves by refinement siliferous eutectic and hardness increase, which improve efficiency of surface preparation operation for coatings.

Key words: decorative coatings, titanium nitride, aluminum alloys, castings, uniformity of color scale, hardness, structure, heat treatment.

Введение

Среди различных методов нанесения тонкопленочных покрытий широкое распространение получил процесс конденсации ионной бомбардировкой (КИБ). Данным методом получают покрытия на основе металлов и их соединений с азотом, углеродом. Наибольшее применение получили покрытия из нитрида титана, качественно имитирующие позолоту. Покрытия отличаются прочным сцеплением с поверхностью изделия и повышенной износостойкостью.

К основным требованиям, предъявляемым к поверхности изделий перед нанесением покрытий методом КИБ, относится отсутствие посторонних загрязнений (ржавчины, масла, других неметаллических материалов) и дефектов (поры, шлаковые включения, окисленные трещины).

При нанесении вакуумных покрытий на алюминиевые сплавы поверхность отливок должна иметь определенную структуру и свойства, также определяющие качество их поверхности с точки зрения получения покрытий. Качество ионно-плазменных покрытий на алюминиевых сплавах оценивается следующими показателями: толщина, пористость, микротвердость, адгезионная прочность, стойкость при окислении и абразивном износе. Для декоративных покрытий учитывается также однородность цветовой гаммы по всей поверхности изделия.

Цель исследования: разработка способов улучшения качества покрытий из нитрида титана, наносимых на заготовки из литейных алюминиевых сплавов.

Материалы и методы исследования

В данной работе исследовалось качество покрытий из нитрида титана на отливках из сплавов АК12, АК5М2, АК9М2, АК12М2 и АМ6. Изделия получали методом литья под давлением. Данный метод является наиболее экономически оправданным в условиях серийного производства и обеспечивает наилучшие показатели качества поверхности отливок перед нанесением ионно-плазменных покрытий.

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

Для получения заготовок была 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. Оптимальные значения параметров галтовки: частота вращения барабанов с отливками $n=170$ об./мин.; длительность галтовки $t=40$ мин. Предварительное и финишное полирование поверхности отливок производили на двухскоростной полировальной установке ВПУ-7000. Длительность предварительного полирования 5 мин., число оборотов полировального круга $V_1=3000$ об./мин. Длительность финишного полирования 5 мин., $V_2=7000$ об./мин.

Результаты исследования

По завершении каждого этапа 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 ионно-плазменных покрытий выполнялось на модернизированной вакуумной установке ННВ-6.6 И1 по методу КИБ. В качестве декоративного покрытия наносили нитрид титана (имитация золотого цвета).

Толщина покрытия 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 всех сплавах.

На отливках из сплавов первых двух систем (Al-Si и Al-Si-Cu) цвет ионно-плазменного покрытия оказался неоднородным: наблюдались темные матовые участки и четкие светлые участки. На рисунке 1 представлен образец после нанесения ионно-плазменного покрытия.



Рис. 1. Заготовка с покрытием TiN: сплав АК5М2.

Неоднородность состояния поверхности существенно ухудшает товарный вид изделия с ионно-плазменным покрытием. На отливках из сплава АМб (система легирования Al-Cu) цвет покрытия был однородным по всей поверхности.

Повышенная пористость и явная неоднородность цвета ионно-плазменного покрытия, по нашему мнению, связаны с наличием на поверхности сплавов систем Al-Si и Al-Si-Cu зон эвтектики (α -фаза + кремний), и тем они значительнее, чем большее содержание кремния в сплаве. Для кремнийсодержащих сплавов алюминия можно предположить, что при прохождении стадий полирования и последующей ионной очистке поверхности отливок в вакуумной камере произошло разрушение и «растравливание» более хрупких зон эвтектики.

В результате в этих зонах изменились электродный потенциал, шероховатость, поверхностные напряжения. Отмеченное создало неодинаковое состояние поверхности отливок при конденсации покрытия. В результате образовалась «пятнистость» поверхности с чередованием матовых (более темных) и светлых участков покрытия, что делает товарный вид изделий с ионно-плазменным покрытием неприемлемым.

Микрогеометрия поверхности после операций шлифование и полирование зависит от ее твердости [1; 2; 7]. Наличие загибов микровыступов на поверхности при низкой твердости приводит к скоплению под ними загрязнений даже при тщательной очистке поверхности перед нанесением покрытий, что снижает параметры их качества. Качество ионно-плазменных покрытий на сплавах системы Al-Si и 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, АК6М2, АК10М2Н.

Режимы кристаллизационного и послекристаллизационного охлаждения в типовой технологии определяются следующими температурно-временными параметрами: 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). Скорость охлаждения отливок в процессе кристаллизации достигает значений 300-800 °С/мин., а после ее завершения – от 1-5 до 10-20 °С/мин.

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

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.

Установлено, что к измельчению дендритной структуры приводит повышение температуры начала ускоренного охлаждения и увеличение скорости послекристаллизационного охлаждения. Так, размер дендритных ячеек для сплавов АК6М2, АК9 и АК10М2Н после типовой технологии равен соответственно 40-44, 31-35 и 32-35 мкм;

при ускоренном извлечении из формы и форсированном охлаждении – 32-34, 24-26 и 25-27 мкм. Ускоренное охлаждение в воде обеспечивает более высокие механические свойства: для сплава АК6М2 при охлаждении в воде $\sigma_b=220-240$ МПа, $\delta=1,4-2,0\%$, а при охлаждении в контейнере $\sigma_b=197$ 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 τ_f 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.

Кинетика процесса старения и изменения твердости алюминиевых сплавов определяются 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 (температура 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 рисунке 2 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.

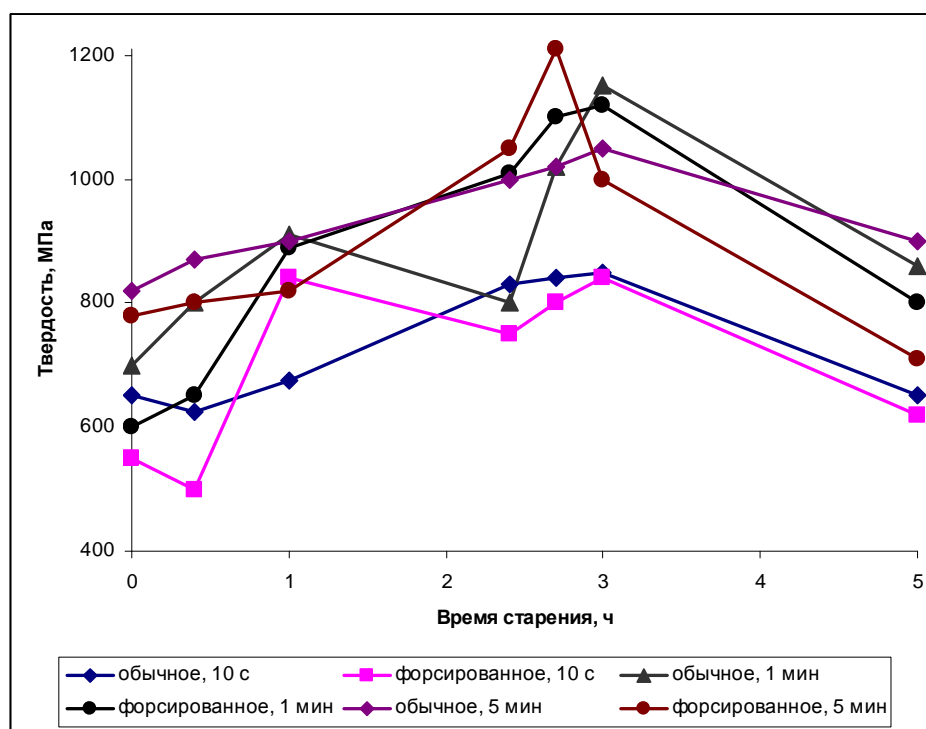


Рис. 2. Изменение твердости при старении.

Как видно из рисунка, твердость сплава в процессе старения меняется немонотонно. Наиболее это характерно для режима с малым $\Delta\tau_3$. 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 $\Delta\tau_3$ не менее 1 мин.; лишь такая выдержка обеспечивает необходимую пересыщенность твердого раствора после закалки.

Применение форсированного охлаждения отливок позволяет получить наиболее высокую твердость сплава, причём 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 ионно-плазменных покрытий. Это, в свою очередь, позволяет получать покрытия из нитрида титана на отливках из сплавов, содержащих кремний, без явной «пятнистости» поверхности.

Исследования (рис. 3) микроструктуры сплава АК12М2 в различных частях литниковой системы показали, что в участках, где действует гидростатическое сжатие, области α -твердого раствора имеют менее ориентированный характер. Уменьшение

толщины канала приводит к измельчению областей α -твердого раствора и эвтектических образований, что подтверждает результаты для других марок сплавов, представленные в [3].

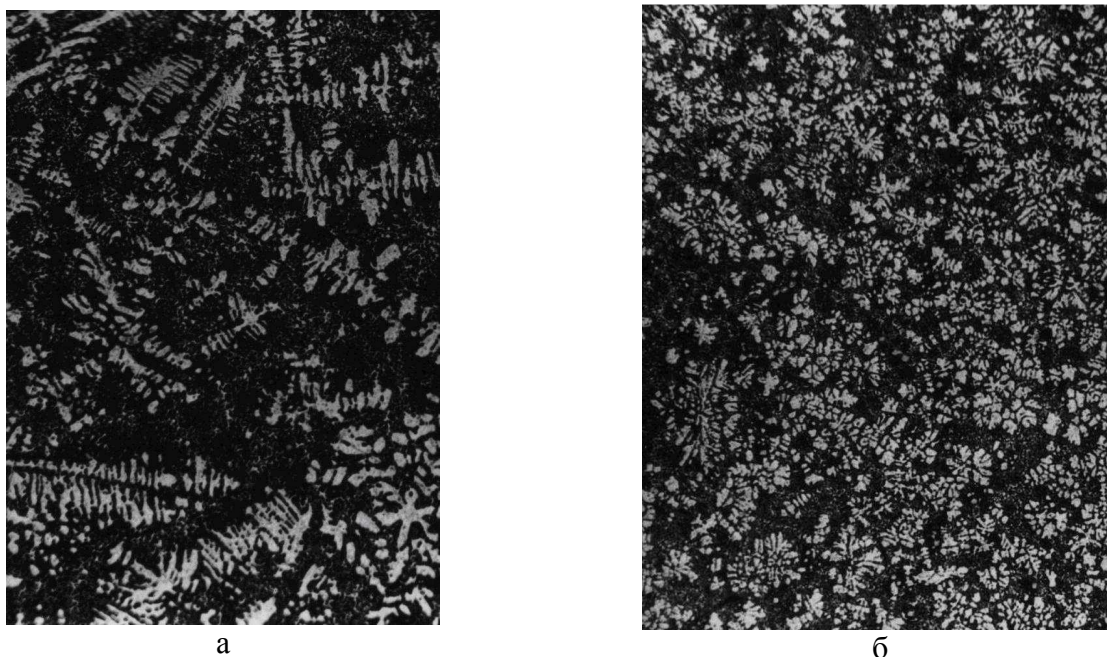


Рис. 3. Микроструктура сплава АК12М2 ($\times 100$) в различных участках литниковой системы: а – литниковый канал (толщина 12 мм), б – питатель (толщина 5 мм).

В то же время гидростатическое сжатие при заполнении формы расплавом может приводить к снижению скорости и степени распада пересыщенного твердого раствора при последующем старении отливок. Так, при прочих равных условиях, после старения при $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 часов твердость НВ в центральной части литникового канала составляла 1080 МПа, а в участках питателя 1020 МПа.

Выводы

1. На отливках из кремнийсодержащих алюминиевых сплавов после нанесения ионно-плазменного покрытия из нитрида титана может наблюдаться неоднородная по цвету поверхность. Качество покрытий зависит от структуры и твердости поверхности отливки, определяющих эффективность проведения подготовительных операций (шлифования, полирования и ионной очистки).

2. С целью улучшения качества покрытий предлагается измельчение дендритной структуры и повышение твердости сплавов путем использования форсированных кристаллизационного и послекристаллизационного охлаждений отливок с одновременным сокращением времени старения. Установлено влияние на дисперсность структуры и твердость особенностей заполнения формы расплавом, определяемых ее геометрией.

Список литературы

1. Дворова Н.В. Выбор режимов термообработки деформируемых алюминиевых сплавов, обеспечивающих нанесение качественных вакуумных ионно-плазменных покрытий // Сборник трудов 5-й Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – С. 99-101.
2. Дворова Н.В. [и др.] Получение качественных ионно-плазменных покрытий и предшествующая обработка алюминиевых сплавов // Международный журнал экспериментального образования. – 2012. – № 5. – С. 56.
3. Муратов В.С., Дворова Н.В., Морозова Е.А. Старение алюминиевых сплавов после литья под давлением // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2011. – № 11. – С. 79.
4. 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.
5. 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.
6. Муратов В.С., Морозова Е.А., Закопец О.И. Структура и свойства форсированно охлажденного после кристаллизации литейного сплава Al-Si-Mg // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2012. – № 4. – С. 82.
7. Муратов В.С., Хамин О.Н., Дворова Н.В. Влияние упрочнения деформируемых алюминиевых сплавов на качество ионно-плазменных покрытий // Материалы 14-й международной научно-практической конференции «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта». – СПб., 2012. – Ч. 2. – С. 155-159.

Рецензенты:

Амосов А.П., д. ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», ФГБОУ ВПО СамГТУ, г. Самара.

Самборук А.Р., д.т.н., заведующий учебно-опытной базой «Петра-Дубрава» ФГБОУ ВПО СамГТУ, г. Самара.