

УДК 669.1

УПРОЧНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

И.Г. Проценко, Ю.А. Брусенцов, И.С. Филатов

*Кафедра «Материалы и технология», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»;
iliaprocenko@rambler.ru*

Ключевые слова и фразы: алюминиевый сплав; жаропрочность; легирующие примеси; микроструктура; твердость; температурно-магнитное упрочнение.

Аннотация: Рассмотрена возможность использования объемного перераспределения легирующих элементов жаропрочного алюминиевого сплава для поверхностного упрочнения изделий с помощью внешнего температурно-магнитного воздействия. Исследована микроструктура полученных образцов и определены их механические свойства.

Жаропрочные алюминиевые сплавы находят широкое применение для изготовления деталей двигателей внутреннего сгорания, которые подвергаются поверхностному воздействию высоких температур.

Эксплуатационные особенности таких сплавов определяют легирующие примеси, входящие в их состав. Некоторые легирующие добавки, такие как железо, марганец, никель, значительно усиливающие прочность межатомных связей без существенного искажения кристаллической решетки, что повышает жаропрочность. В то же время существуют добавки, сильно искажающие кристаллическую решетку твердого раствора, но не влияющие на жаропрочность алюминиевых сплавов.

При длительном воздействии высокой температуры наибольшее сопротивление пластическому деформированию проявляется у твердых растворов с максимальной прочностью межатомной связи и с минимальным искажением кристаллической решетки [1].

Важнейшими структурными факторами, влияющими на жаропрочность алюминиевых сплавов, являются: количество и характер распределения дефектов кристаллической решетки и их взаимодействие между собой и с атомами легирующих элементов.

Жаропрочность при температурах выше $0,6 T_{\text{сол}}$ достигается в основном за счет гетерогенизации структуры [2]. На повышение жаропрочности алюминиевых сплавов наиболее сильно влияют интерметаллические соединения, в состав которых входят переходные металлы: Al_6Mn , Al_7Cr , Al_9FeNi , $\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu}$, $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$. Эти соединения устойчивы при повышенных температурах, они мало взаимодействуют с твердыми растворами, их частицы не склонны к укрупнению, следовательно, не препятствуют перемещению дислокаций, образуя области с повышенной твердостью [3].

Повышенное легирование алюминиевых сплавов жаропрочными компонентами, такими как никель, железо, ведет к повышению хрупкости детали в целом, что приводит к образованию неравномерной скелетной структуры вокруг зерен

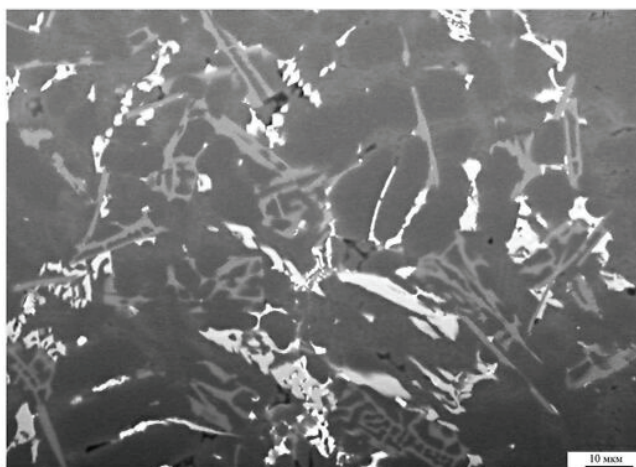


Рис. 1. Микроструктура сплава АК18, определенная сканирующим зондовым микроскопом:
темным участкам соответствует алюминий; светлым – частицы кремния;
серым – включения железа

твердого раствора (рис. 1). Одинаковый по объему детали химический состав сплава в ряде случаев приводит к недостаточной жаропрочности подвергающихся воздействию повышенных температур поверхностных слоев изделия. В то же время повышение концентрации легирующих элементов для увеличения жаропрочности делает деталь чрезмерно хрупкой.

Экспериментально установлено [4], что подобная структура (см. рис. 1) приводит к резкому росту напряжения в эксплуатационной детали, которая может быть использована для повышения жаропрочности поверхностного слоя детали из алюминиевого сплава из-за перераспределения легирующих элементов, вызванного воздействием на образец постоянного или переменного магнитных полей.

Возможность влияния импульсного магнитного поля на структуру алюминиевого сплава, подверженного циклическому равномерному сжатию, рассмотрена в [5]. При этом установлено, что в образцах микротвердость уменьшается с изменением расположения дислокаций в материале, а их отрыв от атомов примесей происходит из-за возбуждения их собственного спинового момента. Однако, при снятии магнитного воздействия, твердость материала со временем восстанавливается, что обусловлено возвращением в исходное состояние спинового момента дислокаций.

Таким образом, можно сделать предположение о том, что при температурно-магнитном воздействии также может существовать вероятность перераспределения ферромагнитных частиц в материале в направлении действия магнитного поля, что приводит к изменению твердости поверхностного слоя.

Рассмотрим вероятность определения возможности использования температурно-магнитного перераспределения частиц в жаропрочных алюминиевых сплавах для упрочнения и повышения жаропрочности поверхностного слоя.

В качестве экспериментального материала выбран жаропрочный алюминиевый сплав АК18, имеющий в своем составе помимо алюминия такие легирующие элементы, как железо в количестве 0,44 %, марганец ~ 1 %, никель 1 %, магний 0,87 % и другие в незначительной концентрации.

Наибольший интерес для предлагаемой методики изменения структуры и фазового состава алюминиевого сплава представляют железо и никель, так как образуемые им переходные металлические соединения являются ферромагнитными материалами [6].

Для проверки возможности влияния внешнего магнитного поля высокой интенсивности для температурно-магнитного перераспределения частиц легирующих элементов в составе алюминиевого жаропрочного сплава, подготовлены образцы. Они подвергались плавлению в керамических тиглях под слоем флюса и последующим охлаждением на воздухе в постоянном магнитном поле напряженностью 20 кА/м.

Можно предположить, что в образцах возможно вызвать перераспределение легирующих элементов сплава в магнитном поле при охлаждении. Точка Кюри наиболее стабильного химического соединения алюминия с железом – Fe_3Al , составляет 550 °С, что практически исключает возможность перемещения данных упрочняющих частиц в расплаве.

В целях выявления изменения структуры поверхности за счет перемещения ферромагнитных частиц сплава, подготовлены микрошлифы. После химического травления в специальном растворе Дикса и Кейта [7] получена микроструктура сплава. Ее рассмотрение проводилось с помощью микроскопа МИИ-3 при увеличении $\times 100$ (рис. 2, 3).

Анализ микроструктуры показал, что при рассмотрении продольного сечения образцов в центре можно выделить зерна сплава одинакового химического состава, соответствующие алюминиевой основе – 1 (см. рис. 2, а). Они имеют средний размер порядка 100 мкм. В структуре присутствуют также неравномерные выделения легирующих элементов и образованных ими химических соединений – 2, расположенных по границам зерен сплава. Микроструктура по краям образца, в направлении действия магнитного поля, позволила установить, что в зернах алюминиевой основы одинакового химического состава 1 наблюдаются более интенсивное выделение железосодержащих соединений 2 и их выраженная направленность (см. рис. 2, б), что может быть объяснено перераспределением легирующих элементов, входящих в состав сплава, с помощью магнитного поля при охлаждении.

Микроструктура в центре поперечного сечения образца представляет собой крупные зерна алюминиевого сплава одинакового химического состава 1 (см. рис. 3, а), при этом на границах данных зерен, по сравнению с продольным сечением, выделение легирующих элементов и образованных ими устойчивых химических соединений – 2, наблюдается в меньшей степени. Анализ микроструктуры по краям образца показал, что в зернах сплава одинакового состава – 1 (см. рис. 3, б) также наблюдается выделение железосодержащих соединений 2, однако их количество заметно выше по сравнению с содержанием аналогичных включений в центре.

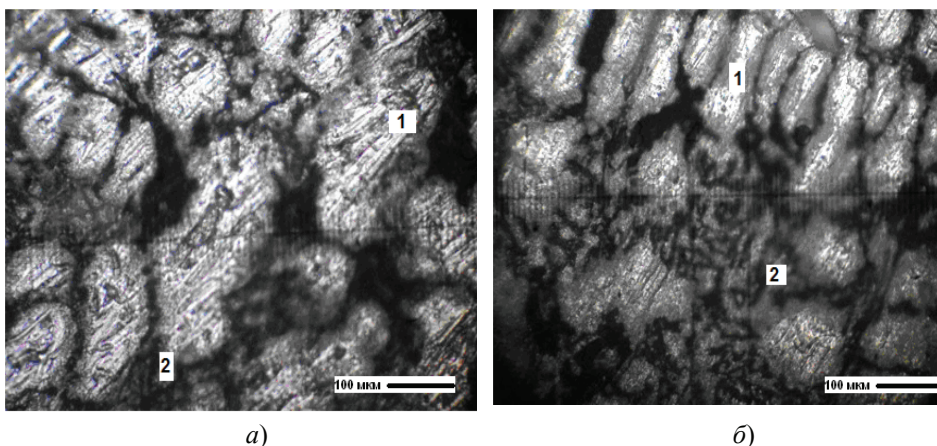
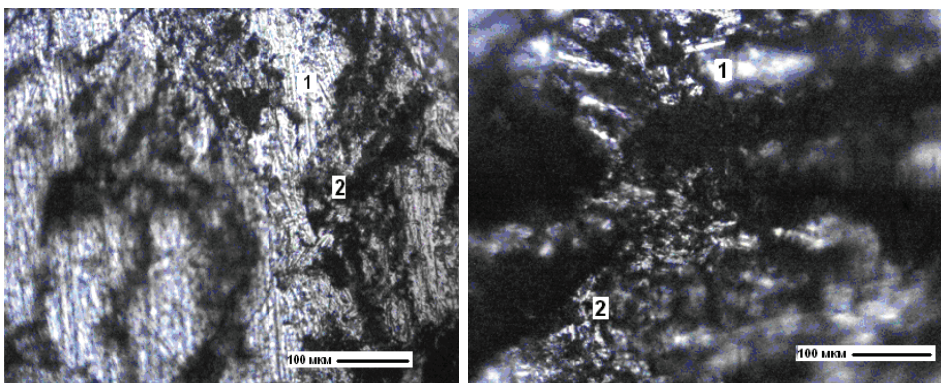


Рис. 2. Структура продольного сечения образца в центре (а) и по краям (б)



a)

б)

Рис. 3. Структура поперечного сечения образца в центре (а) и по краям (б)

Таким образом, можно выдвинуть предположение о том, что на количественный и качественный составы железосодержащих фаз сплава в краевых областях образцов сказывается совместное воздействие высокой температуры и магнитного поля. При этом ориентация фаз совпадает с направлением действия магнитного поля. В то же время анализ центральных областей образцов показывает однородность фазового состава, характерную для данного сплава при равномерном охлаждении без внешних воздействий.

После анализа микроструктуры, проведено измерение твердости по окружности поверхности образцов, подверженных воздействию магнитного поля при высоких температурах. Измерение велось микротвердомером ПМТ-3, результаты представлены в виде графической зависимости (рис. 4).

Из рисунка 4 видно увеличение твердости поверхностных слоев образцов в направлении действия магнитного поля (начало-середина графика). Его значение несколько выше принятого для данного сплава, что позволяет предположить наличие в данных областях повышенного содержания легирующих элементов и их устойчивых соединений. В то же время в точках, расположенных перпендикулярно направлению магнитного поля, наблюдается твердость, сопоставимая со средним значением для данного сплава, что предполагает равномерность химического состава.

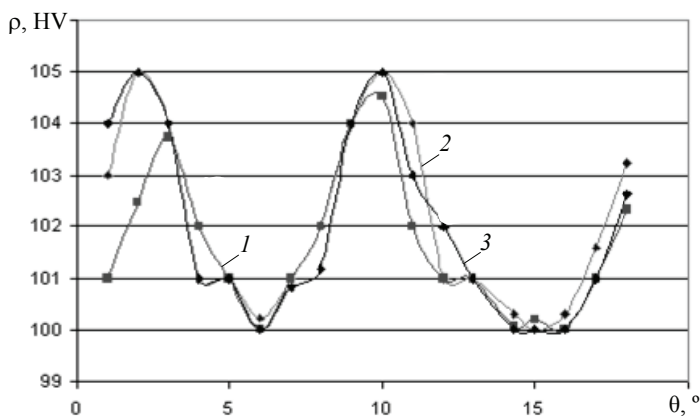


Рис. 4. Измерение твердости образцов АК18 после температурно-магнитного воздействия

Таким образом, график твердости показывает, что при воздействии магнитного поля высокой напряженности наблюдается перераспределение легирующих элементов, в частности соединений алюминия с железом, что подтверждается микроструктурой после химического травления, а также изменением твердости образцов в плоскости действия магнитного поля, которая увеличивается. Перераспределение легирующих элементов в плоскости действия магнитного поля позволяет сделать предположение о возможности изменения химического состава и поверхностных свойств деталей из алюминиевых сплавов за счет воздействия внешнего магнитного поля на расплав материала.

Предполагается возможность совместного воздействия градиента температуры и магнитного поля для перераспределения по объему деталей компонентов сплавов на основе меди и других металлов. Это позволит получать оптимальные показатели в наиболее нагруженных частях изделий, делая их легче и прочнее. В данном направлении планируется продолжение экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Колобнев, И.Ф. Жаропрочность литейных алюминиевых сплавов: структура и свойства / И.Ф. Колобнев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1973. – 320 с.
2. Мальцев, М.Е. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов / М.Е. Мальцев. – М. : Металлургия, 1970. – 368 с.
3. Зусин, В.Я. Сварка и наплавка алюминия и его сплавов / В.Я. Зусин, В.А. Серенко. – Мариуполь : Рената, 2004. – 468 с.
4. Белов, Н.А. Фазовый состав и структура силуминов : справ. изд. / Н.А. Белов, С.В. Савченко, А.В. Хван. – М. : Изд-во МИСиС, 2007. – 283 с.
5. Павлов, А.В. Влияние импульсного магнитного поля на микротвердость алюминиевого сплава системы Al-1,6%Mn, после 3D-осадки / А.В. Павлов, Я. Презлавски // Студенческий научный форум 2012 : IV Междунар. студен. электрон. науч. конф., 15 февр. – 31 марта 2012 г. / Российская академия естествознания. – С. 105–112.
6. Диаграммы состояния двойных металлических систем : справочник : в 3 т. Т. 1 / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М. : Машиностроение, 1996. – 992 с.
7. Справочник по металлографическому травлению : пер. с нем. / М. Беккерт, Х. Клемм. – М. : Металлургия. – 1979. – 336 с.

Hardening of Aluminum Heat-Resistant Alloys

I.G. Protsenko, Yu.A. Brusentsov, I.S. Filatov

*Department "Materials and Technology", TSTU, Tambov;
iliaprotsenko@rambler.ru, ridder@mail.ru.*

Key words and phrases: aluminum alloy; dopants; hardness; high-temperature strength; microstructure; temperature and magnetic hardening.

Abstract: The paper explores the possibility of using bulk redistribution of elements of heat resistant aluminum alloy for surface hardening of products by external temperature and magnetic field interference. The microstructure of the samples has been studied; their mechanical properties have been determined.

Festigung der hitzebeständigen Aluminiumlegierungen

Zusammenfassung: Es ist die Möglichkeit der Nutzung der räumlichen Umverteilung der legierenden Elemente der hitzebeständigen Aluminiumlegierung für die oberflächliche Festigung der Erzeugnisse mit Hilfe der äußerlichen temperaturmagnetischen Einwirkung betrachtet. Es ist die Mikrostruktur der erhaltenen Muster untersucht und es sind ihre mechanischen Eigenschaften bestimmt.

Consolidation des alliages d'aluminium résistant à la chaleur

Résumé: Est considérée la possibilité de l'utilisation de la redistribution volumineuse des éléments d'addition de l'alliage d'aluminium résistant à la chaleur pour la consolidation de la surface des produits à l'aide de l'action extérieure de la température et celle magnétique. Est étudiée la microstructure des exemples reçus et sont définies leurs propriétés.

Авторы: *Проценко Илья Григорьевич* – аспирант кафедры «Материалы и технология»; *Брусенцов Юрий Анатольевич* – кандидат технических наук, профессор кафедры «Материалы и технология»; *Филатов Иван Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Фесенко Александр Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
