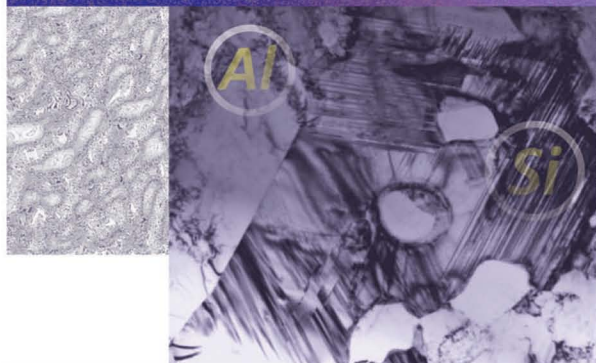




МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ

эвтектического
силумина

электронно-
ионно-плазменной
обработкой



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
Физико-технический институт

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ эвтектического силумина электронно- ионно-плазменной обработкой

Под редакцией А. П. Ласковнева



Минск
«Беларуская навука»
2013

Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой / А. П. Ласковнев [и др.]; под ред. А. П. Ласковнева. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 287 с. – ISBN 978-985-08-1632-0.

В монографии систематизированы и обобщены результаты, полученные при исследовании структуры и свойств поверхностных слоев эвтектического поршневого силумина, модифицированного методами электронно-ионно-плазменного воздействия. Описаны физические процессы, протекающие при взаимодействии высокоинтенсивных электронных пучков и компрессионных плазменных потоков с поверхностью, рассмотрены механизмы, ответственные за формирование структуры модифицированного слоя. Рассматриваются основы технологий целенаправленной модификации силуминов при воздействии электронными пучками и плазменными потоками.

Предназначена для специалистов в области материаловедения алюминиевых сплавов и физики взаимодействия потоков заряженных частиц и плазмы с веществом, а также для аспирантов и студентов высших учебных заведений соответствующих специализаций.

Табл. 15. Ил. 169. Библиогр.: 288 назв.

А в т о р с к и й к о л л е к т и в:

А. П. Ласковнев, Ю. Ф. Иванов, Е. А. Петрикова, Н. Н. Коваль,
В. В. Углов, Н. Н. Черенда, Н. В. Бибик, В. М. Асташинский

Р е ц е н з е н т ы:

академик НАН Беларуси, доктор технических наук,
профессор С. А. Астапчик
член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук,
профессор А. Ф. Ильющенко

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие научно-технического прогресса во всех отраслях промышленности требует от материаловедов разработки новых материалов, обладающих комплексом высоких эксплуатационных свойств и высокой технологичностью в процессе производства. При этом следует отметить, что повышение эксплуатационной надежности современной техники без существенного увеличения их массы и стоимости – весьма сложная и в то же время актуальная задача сегодняшнего дня. Здесь особое место занимают сплавы с низкими значениями температурного коэффициента линейного расширения в сочетании с необходимым уровнем механических свойств. Например, для изготовления различных узлов космических аппаратов нужны сплавы с малой удельной массой и низким температурным коэффициентом линейного расширения. Разработанные к настоящему времени прецизионные сплавы на основе системы железо-никель обладают уникальными физическими свойствами, однако эти сплавы имеют и ряд недостатков, которые в основном сводятся к сложной технологии их получения и обработки, высокой стоимости и большой удельной массе.

В последнее время пристальное внимание уделяется поиску композиций сплавов на основе алюминия, среди которых одной из перспективных является система **Al-Si**. Развитие двигателестроения, в том числе форсированных высокооборотистых моторов для автотракторной техники, где часто наблюдаются смятие и преждевременный износ канавки, в которой размещаются компрессионные кольца, обусловило применение биметаллических

поршней с упрочняющей вставкой в силуминовой матрице. Система Al-Si в очередной раз оказалась наиболее перспективной для массового производства деталей поршневой группы, что обусловлено рядом причин, важнейшими из которых являются следующие:

- содержание кремния и алюминия в земной коре наибольшее (29,5 и 8,05 % соответственно);
- кремний более существенно, по сравнению с другими легирующими элементами, снижает температурный коэффициент линейного расширения алюминия;
- алюминий имеет малую удельную массу, которая дополнительно уменьшается при легировании кремнием.

Одним из направлений дальнейшего развития в этой области является разработка и использование заэвтектических сплавов системы Al-Si. Введение в алюминий большого количества кремния (от 20 мас.% и выше) обеспечивает низкий коэффициент линейного расширения сплава. Однако для практического использования заэвтектических силуминов как конструкционного материала необходимо решить ряд проблем, связанных с их неудовлетворительными физико-механическими свойствами (высокая хрупкость). В последние годы исследователями был выполнен ряд работ по технологии выплавки, закономерностям структурообразования и свойствам заэвтектических сплавов системы Al-Si. **Вместе с тем, существующие методы модифицирования заэвтектических силуминов, хотя и позволяют значительно измельчить первичные выделения кремния и улучшить эксплуатационные свойства отливок, недостаточно эффективны для получения литейного полуфабриката.** В качестве деформируемых до настоящего времени используются сплавы с содержанием кремния лишь до 13%, которые были разработаны более 55 лет назад. Наиболее успешно в последние годы проводятся исследования по деформированию заэвтектических силуминов японскими учеными, однако технология приготовления и формообразования полуфабрикатов и изделий в опубликованных работах не описывается. Российскими учеными на основе системы Al-Si методами гранульной металлургии разработаны сплавы

с низким коэффициентом линейного расширения, содержащие 26–30% кремния. Экструдированные полуфабрикаты (прутки) из таких сплавов обладают высокими показателями прочности и удовлетворительной пластичностью. Необходимо, однако, отметить, что технология производства таких сплавов отличается дороговизной, а изготовление из них деталей – весьма трудоемкий, технологически трудно осуществимый процесс, характеризующийся неудовлетворительными значениями коэффициента использования металла.

Еще одним перспективным направлением является модификация структуры поверхностных слоев сплавов с целью придания им требуемых свойств. Принципиально новые возможности для модификации поверхностных свойств различных материалов и существенного улучшения их эксплуатационных характеристик предоставляет использование в промышленности концентрированных потоков энергии, включающих электронные, ионные, плазменные и лазерные пучки. Основными преимуществами таких методов модификации являются возможность реакционного взаимодействия дисперсных включений с алюминиевой основой и азотом, диспергирование структуры (в том числе первичных кристаллов кремния), синтез наноразмерных метастабильных фаз, а также нанокомпозитов и интерметаллидов, обладающих уникальными физико-химическими характеристиками. Вместе с тем, возрастающие потребности промышленности в новых материалах обуславливают необходимость поиска и применения гибридных методов, основанных на комплексном воздействии различных типов концентрированных потоков энергии или совмещении различных видов модификации при использовании одного из типов концентрированных потоков энергии. Особенно актуальным является применение таких методов для модификации алюминиевых сплавов, более широкое применение которых в промышленности сдерживается низкими трибологическими и прочностными характеристиками. Полученные к настоящему времени результаты уже показали перспективность использования высокоинтенсивных электронных пучков и плазменных потоков

субмиллисекундной длительности для существенного улучшения эксплуатационных свойств, таких как износостойкость, усталостная прочность, жаростойкость и др.

В данной книге систематизированы и обобщены результаты исследований по модификации структуры и свойств поверхностных слоев эвтектического поршневого силумина методами электронно-ионно-плазменного воздействия.

В первой главе представлены основные сведения по структуре и свойствам силуминов, современному состоянию и дальнейшему развитию поршневых сплавов. Уделено внимание специфике работы поршня и приработке поршневой группы.

Во второй главе рассмотрены принципы генерации высокоинтенсивных электронных пучков и компрессионных плазменных потоков, а также описаны типы ускорителей, созданных в Институте сильноточной электроники СО РАН и в лаборатории физики плазменных ускорителей Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. Рассмотрена динамика взаимодействия компрессионных плазменных потоков с поверхностью.

В третьей и четвертой главах изложены результаты исследований по модификации структуры, элементного и фазового состава, а также свойств поверхностного слоя эвтектического силумина под воздействием высокоинтенсивных электронных пучков и компрессионных плазменных потоков. Рассматривается целый ряд направлений модификации, включающий:

- непосредственное воздействие;
- легирование поверхностного слоя путем нанесения пленки или покрытия, содержащего легирующие элементы, на поверхность силумина и последующей обработки высокоэнергетическими потоками;
- комбинированное воздействие плазмой электрического взрыва проводящих материалов и высокоинтенсивным электронным пучком;
- комбинированное воздействие осаждением сверхтвердого нанокристаллического покрытия и последующей обработки высокоинтенсивным электронным пучком.

1.1. Структура и свойства силуминов

1.1.1. Система алюминий–кремний (двойные сплавы)

Система алюминий–кремний является основой большинства современных алюминиевых литейных сплавов (данные по растворимости кремния в твердом алюминии приведены в табл. 1.1).

Таблица 1.1. Изменение растворимости кремния в алюминии в зависимости от температуры [1]

Доля кремния	Температура, К								
	850	825	800	750	700	650	600	550	500
Массовая доля, %	1,65	1,30	1,10	0,70	0,45	0,25	0,10	0,04	0,01
Атомная доля, %	1,58	1,25	1,05	0,67	0,44	0,24	0,10	0,04	0,01

Диаграмма состояния относится к эвтектическому типу, так как в равновесии находятся твердый раствор кремния в алюминии и твердый раствор алюминия в кремнии (рис. 1.1).

В соответствии с диаграммой состояния силумины могут быть по своей структуре доэвтектическими, эвтектическими и заэвтектическими. При этом каждая из названных групп характеризуется своим режимом приготовления сплава. Как известно, доэвтектические промышленные силумины содержат до 9% кремния, а структура их состоит из участков α -твердого раствора, между которыми располагается эвтектика α +Si. Эвтектические сплавы содержат 9–13% Si, а структура их, кроме эвтектики, может включать дендриты α -твердого раствора и небольшое количество первичных кристаллов кремния. Заэвтектические сплавы обычно содержат более 13% Si и состоят из первичных кристаллов кремния и эвтектики.

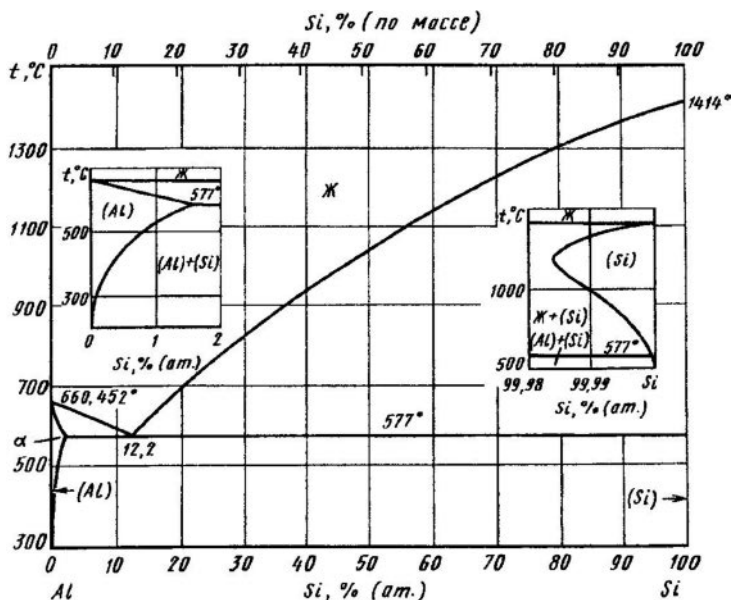


Рис. 1.1. Диаграмма состояния Al-Si [1]

При рассмотрении роли жидкого состояния в процессах формирования структуры силумина предполагается [2], что жидкий сплав Al-Si – это раствор атомов алюминия и перешедших в металлическое состояние атомов кремния, в котором «плавают» кластеры кремния, имеющие кристаллическую структуру. Представлена структурная диаграмма [2], в соответствии с которой можно выделить три компонента жидкой системы Al-Si: **раствор кремния в алюминии** ($Ж_{Al}$), **кремний, находящийся в ковалентном состоянии** (Si_k), **кремний, находящийся в металлическом состоянии** (Si_m). Возникновение кластеров кремния связывают с появлением специфических сил донорно-акцепторного взаимодействия между атомами алюминия и кремния. Согласно представленной модели электронное облако, возникающее вблизи данного атома кремния, а также повышенная электронная плотность в этой области затрудняют размещение «по соседству» других атомов кремния, вследствие чего при определенной концентрации эти атомы выталкиваются из раствора и образуют

кластеры. Причем кластеры типа Si_k , упаковка атомов которых резко отличается от таковой в кристалле, – «некристаллизующиеся». В работе [2] предлагается теория формирования структуры сплавов Al-Si. В ней эвтектическая кристаллизация рассматривается при ведущей роли «кристаллизующихся» кластеров, которые являются зародышами квазипервичных кристаллов кремния, где равномерное распределение первых приводит к одновременной кристаллизации по всему объему жидкости с образованием грубоигольчатой эвтектики. Численность кластеров кремния может регулироваться добавками или режимами охлаждения, что позволяет ликвидировать квазипервичные кристаллы кремния с образованием чисто эвтектической структуры.

Авторами работ [2, 3] сделана попытка объяснения морфологии эвтектики и первичных кристаллов кремния. Предполагается [3], что при эвтектической кристаллизации в условиях обычных скоростей охлаждения средняя степень ассоциации атомов кремния в жидкости такова, что преобладающая форма роста кристаллов – пластины (ленты) с развитыми гранями. Если при первичной кристаллизации реализуются высокие скорости охлаждения (более 35–40 К/мин), то могут возникнуть кристаллы в форме куба как результат роста за счет присоединения одиночных атомов или небольших кластеров. Увеличение степени ассоциации кремния и переход к пластинчатой форме роста за счет присоединения крупных микрогруппировок способствует уменьшению скорости охлаждения расплава. Установление связи между свойствами расплавов и полученного из них твердого металла – один из основных вопросов современной теоретической металлургии. С увеличением содержания кремния усиливается охрупчивание, к которому приводит наличие грубоигольчатой эвтектики и первичных выделений кремния в структуре двойного сплава. Открытие модифицирования (1920 г.) стало настоящим переворотом в металлургии и до настоящего времени оно является основным методом улучшения структуры. Сущность его состоит в том, что небольшие добавки определенных элементов измельчают выделения первичного и эвтектического кремния. При этом, например, измельчение и сфероидизация

кристаллов кремния в эвтектике приводит к повышению на 30–40% предела прочности и в 2–3 раза относительного удлинения [4]. Одним из эффективных модификаторов эвтектики является натрий. Кроме него в качестве действенных эвтектических модификаторов применяют калий, висмут, свинец, кадмий, сурьму, кальций, литий, магний, хром, марганец, цинк, серу, никель, стронций [2]. Как правило, элементы модификатора вводят в расплав в виде смеси солей [2, 4, 5]. Для модификации первичных кристаллов кремния как наиболее эффективный применяется фосфор, который вводится либо в чистом виде, либо в виде сплавов, соединений, смесей. Модифицирующее действие на первичные кристаллы кремния оказывают также бериллий, мышьяк, сера, йод.

Действие вводимых в расплав вышеперечисленных веществ состоит в том, что они как элементы-модификаторы эвтектики при условии большей энтальпии связи их с кремнием, чем с алюминием, уменьшают долю «кристаллизующихся» кластеров, что происходит и в результате увеличения степени переохлаждения. При этом инициатором кристаллизации становятся квазипервичные кристаллы α -твердого раствора, зарождение которых существенно облегчается у поверхности охлаждения, и модифицированная эвтектика затвердевает путем образования твердой корки у поверхности охлаждения с последовательным ростом внутрь расплава. В связи с увеличением степени ассоциации атомов кремния и доли кластеров типа Si_k происходит изменение морфологии кремния от пластинчатой к волокнистой дендритной. Положительное действие вибраций на расплав Al-Si объясняется разрушением кластеров типа Si_k и изменением хода кристаллизации с выделением квазипервичных α -кристаллов. Эффект модифицирования первичных кристаллов кремния, по мнению многих исследователей, наряду с затруднением роста из-за адсорбции атомов фосфора на гранях растущих кристаллов связан и с возможностью увеличения общего числа центров кристаллизации типа Si_k за счет добавок модификатора.

Для повышения эксплуатационных свойств силуминов также применяется рафинирование. Необходимость его продикто-

вана прежде всего тем, что в процессе плавки и литья происходит загрязнение сплавов неметаллическими включениями, которые преимущественно располагаются по границам зерен, ухудшая в дальнейшем механические свойства. Среди наиболее эффективных способов рафинирования сплавов Al-Si можно выделить обработку флюсами, продувку инертным или активным газом, обработку гексахлорэтаном, фильтрацию [4, 5]. Применяется также вакуумное фильтрование и электролитическое рафинирование силицидов.

Одним из распространенных и надежных способов получения необходимых свойств материала является термическая обработка. Необходимо отметить, что двойные сплавы Al-Si обладают низкой восприимчивостью к термической обработке на упрочнение [3, 5, 6]. Повышению эффекта при термообработке способствует модифицированная структура. При этом результат составляет 10–20% от исходной прочности [6], что объясняется высокой скоростью диффузии кремния в твердом алюминии и тем, что выпадающие из раствора частицы кремния некогерентны по отношению к матрице. Экспериментально доказано [5], что пересыщенный твердый раствор кремния в алюминии полностью распадается при 370 К за 100 ч, при 555 К – за 40 мин, при 615 К – за 20 мин. Выделяющиеся при этом частицы кремния быстро коагулируют с образованием крупных включений, соизмеримых с эвтектическими. Процесс распада твердого раствора можно ускорить действием пластической деформации. С увеличением скорости охлаждения происходит определенное ускорение ранних стадий старения и измельчение выделений, но сплавы, закаленные из жидкого состояния, старятся медленно [5]. Наличие кристаллов свободного кремния на процесс старения влияет незначительно или не влияет вовсе [5, 6]. Заметно влияет на структуру двойных сплавов естественное старение, предшествующее искусственному. Например, в сплавах, состаренных при 475 К, плотность выделений составляет около 10^6 частиц/см³, а предварительно выдержанных при комнатной температуре и затем состаренных при 475 К – 10^{14} частиц/см³ [7]. Наиболее широкое применение

из двойных сплавов в промышленности нашел сплав АК12(АЛ2), содержащий 10–13% Si, что обусловлено его наилучшими литейными свойствами. После термической обработки по режиму Т2 сплав подвергается дополнительной термоциклической обработке, вызываемой наличием фаз со значительно различающимися значениями коэффициента линейного расширения. Примеси железа, часто присутствующие в сплаве АК12, оказывают отрицательное влияние на механические свойства и, согласно [8], при увеличении содержания их с 0,2 до 1% ударная вязкость материала уменьшается в 4–5 раз, а относительное удлинение – более чем в 3 раза. Вредное влияние железа можно в определенной степени нейтрализовать введением в расплав таких элементов, как молибден, марганец [3, 5].

1.1.2. Легированные силумины

В промышленном производстве сплавы на основе Al-Si используются преимущественно легированными. Легирование применяется для повышения механических свойств и увеличения восприимчивости сплавов к упрочняющей термической обработке. Легированные силумины в зависимости от содержания основных компонентов разделяют на 5 групп [9]: Al-Si, Al-Si-Mg, Al-Si-Mg-Mn, Al-Si-Cu-Mg, Al-Si-Cu-Mg-Mn. В связи с многокомпонентным составом легированных силуминов температура нагрева под закалку определяется температурой плавления наиболее легкоплавких эвтектик и, согласно данным [5], находится ниже 830 К для сплавов без меди и ниже 810 К – для медьсодержащих. Исследуются составы наиболее вероятных эвтектик в легированных силуминах. При закалке чувствительность сплавов к скорости охлаждения невысокая: ступенчатая закалка несколько снижает свойства, однако закалка в среде, имеющей температуру старения, благоприятна [5]. Практически не отмечается естественное старение, а искусственное происходит в интервале 420–450 К в течение 4–12 ч, хотя в зависимости от конкретного сплава возможны и более высокие температуры.

Магний, образующий с кремнием интерметаллиды Mg_2Si высокой твердости, является одним из наиболее распространенных легирующих элементов в составе силуминов, используемых в промышленности. Согласно [2], при термической обработке частицы Mg_2Si диссоциируют в твердый раствор, а при старении выделяются в мелкодисперсной форме. Наиболее вероятная схема распада твердого раствора включает следующие этапы: образование зон Гинье–Престона (ЗПГ), образование промежуточной фазы $\beta'(\text{Mg}_2\text{Si})$, образование частиц стабильной фазы Mg_2Si . Очевидно, что максимальная прочность сплавов с магнием достигается на стадии преобладания в структуре игольчатых зон в сочетании с выделениями фазы β' . Естественное старение, оказывающее заметное влияние на уровень механических свойств, предшествующее искусственному, связано с изменением плотности выделений, которая зависит от механизма зарождения частиц второй фазы [10]. Авторами отмечено положительное влияние термоциклической обработки на свойства сплавов системы Al-Si-Mg , которая позволяет не только улучшить весь комплекс механических свойств, особенно пластичность, но и уменьшить продолжительность обработки в 2,5–4 раза. Введение добавок магния не только способствует упрочнению, но и улучшает обрабатываемость резанием, повышает характеристики ползучести и горячеломкости силуминов [5]. Наряду с магнием для повышения механических свойств, в частности жаропрочности, в силумины часто вводят медь. Общий эффект упрочнения при термообработке в тройных сплавах меньше, чем в двойных сплавах Al-Cu , причем упрочнение тем меньше, чем выше содержание кремния. Согласно [2] при легировании бинарного силумина медью общий эффект практически не зависит от содержания кремния. Закалка сплавов с медью дает значительно больший прирост прочности, чем последующее старение. Чтобы сохранить тройную эвтектику от оплавления при нагреве под закалку необходимо очень медленно повышать температуру в диапазоне 773–798 К или применять ступенчатый отжиг с длительными выдержками при данной температуре. Установлено [2], что добавки меди повышают сопротивление усталости

и литейные свойства силумина и ухудшают обрабатываемость резанием, особенно после термообработки, а также коррозионную стойкость. Необходимо также отметить, что отрицательное влияние железа не проявляется в медьсодержащих силуминах при его концентрации менее 0,25%.

Добавки марганца повышают жаропрочность, сопротивление усталости, улучшают характеристики ползучести снижают электропроводность силумина, устраняя, как уже было отмечено, вредное влияние железа [2]. В сплавах Al-Si кроме основных легирующих элементов могут присутствовать добавки других элементов. Например, добавки цинка вводят в количестве ~3% для повышения прочности, улучшения обрабатываемости резанием, однако получая при этом снижение жаропрочности [11]. Необходимо выделить особенность цинковистых силуминов, заключающуюся в способности к самозакаливанию, происходящему при кристаллизации.

Сплав, разработанный на основе системы Al-Si-Cu-Zn-Mg [9], имеет высокие механические свойства ($\sigma_b = 420\text{--}460$ МПа, $\delta = 4\text{--}6\%$), позволяющие успешно конкурировать не только с высокопрочными литейными сплавами других систем (АМ5, АМ4, 5Кд), но и в отдельных случаях с деформируемыми сплавами (АК4, АК6) [9]. Присутствие в этих сплавах до 3% кобальта, хрома, молибдена, бериллия и никеля повышает жаропрочность и прочность; кроме того, кобальт и хром повышают электросопротивление. Титан, бор и цирконий положительно и активно влияют на кинетику распада твердого раствора в сложнелегированных силуминах, повышают прочностные свойства сплавов и измельчают зерно. Для улучшения обрабатываемости резанием в сплавы можно ввести свинец и олово, однако они снижают жаропрочность, а в результате образования легкоплавких фаз и эвтектик, которые при нагреве под закалку плавятся, силумины охрупчиваются. Сурьма и кадмий положительно влияют на механические свойства сплавов Al-Si, если их содержание не превышает 0,4%. Согласно результатам работы [5] присадки натрия существенно ухудшают жидкотекучесть и увеличивают пористость.

Как известно, все используемые в промышленности сплавы на основе системы Al-Si делят по их назначению на три группы: конструкционные, жаропрочные и сплавы специального назначения. Для изготовления деталей, работающих при нормальной температуре и воспринимающих различные нагрузки, используют конструкционные силумины. Сложно легированные сплавы с эвтектической или заэвтектической концентрацией кремния используют для изготовления деталей, работающих в условиях усложненного теплоотвода, знакопеременных нагрузок, например, поршней двигателей внутреннего сгорания. Антифрикционные сплавы, припои относят к сплавам специального назначения. Авторы [5] приводят химический состав, область применения и способы получения перечисленных силуминов. Условно припои на основе силуминов разделены на 4 группы: Al + 6% Si, Al + 7,5% Si, Al + 12% Si, Al + 10% Si + 4% Cu (причем Al + 12% Si имеет сравнительно высокую коррозионную стойкость). Полученные характеристики связаны с составом и температурой испытаний. Несмотря на присутствие легирующих элементов в заэвтектических сплавах, увеличение содержания кремния снижает их предел прочности и пластичность. Усталостная прочность определяется уровнем легирования твердого

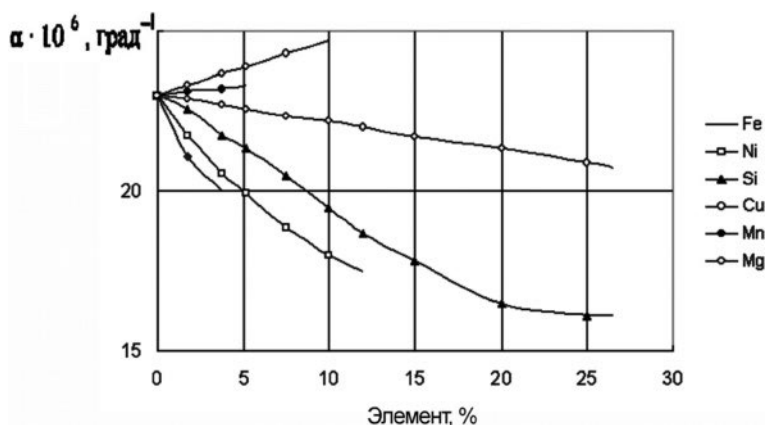


Рис. 1.2. Влияние массовой доли легирующих элементов на линейное расширение алюминия

раствора, формой и характером распределения хрупких включений и может быть повышена пластическим деформированием сплава. Термоциклическая стойкость сплава может быть также повышена воздействием пластического деформирования. Как правило, термоусталостные трещины проходят по линии, на которой лежат первичные кристаллы кремния, а в доэвтектических сплавах – по зонам, локально обогащенным кремнием. Коэффициент линейного расширения с увеличением содержания кремния снижается, но в легированных силуминах он также зависит и от концентрации других элементов. Влияние некоторых элементов на линейное расширение алюминия показано на рис. 1.2 (его теплопроводность при введении кремния снижается на 20–30% [5]).

Сопrotивление коррозии силуминов такое же, как и у алюминия, причем высокую коррозионную стойкость силуминов объясняют улучшением за счет кремния защитных свойств окисной пленки на поверхности алюминия [2].

1.1.3. Свойства силуминов в зависимости от газосодержания атмосферы

В процессе приготовления алюминия или его сплавов расплав активно взаимодействует с окружающей средой, при этом происходит поглощение газов с образованием химических соединений или растворов. В процессе кристаллизации расплава на границе раздела твердой и жидкой фаз возникает газовый зародыш, который удерживается капиллярными силами и увеличивается в объеме за счет диффундирующих в него газов. Если силы отрыва газового пузырька становятся больше сил прилипания, он отрывается от твердой поверхности, стремясь вверх. Газовые пузырьки, не успевшие подняться в процессе кристаллизации на поверхность расплава, оставаясь в нем, способствуют образованию в отливках газовой пористости. Химические соединения газов с металлами являются источниками образования в сплавах твердых неметаллических включений, располагающихся в основном по границам зерен, нарушая

тем самым связь между ними, что в свою очередь снижает прочность изделия.

Алюминий и его сплавы могут содержать водород, кислород, азот, метан и другие углеводороды, при этом содержание их может колебаться от 2 до 30 см³/100 г металла. Водород присутствует во всех сплавах алюминия [5], причем его доля в суммарном содержании газов составляет 70–90%. Предполагается [12], что водород в алюминии появляется в результате взаимодействия расплава с водяным паром, адсорбирующимся на внешней и внутренней поверхности, т. е. на поверхностях кристаллов и мозаичных блоков, при температурах выше 500 °С. Сущность реакции состоит в диссоциации пара, образовании оксида алюминия и выделении водорода. Экспериментально подтверждается, что примеси оксида алюминия и водород в расплаве сопутствуют друг другу.

Одним из важнейших источников наводороживания алюминиевых сплавов и, в частности, силуминов, является состояние шихтовых материалов [13, 14]. Что касается алюминия, то по данным [12], черновой алюминий, извлекаемый из ванн, содержит водород, появляющийся в результате электролитического разложения воды, попадающей в криолито-глиноземный расплав с сырьем. С возрастанием температуры растворимость водорода в твердом алюминии увеличивается и составляет при 933 К 0,036 см³/100 г [15, 16]. В жидком алюминии растворимость водорода 0,69 см³/100 г, причем она увеличивается с повышением температуры до 2573 К, а затем снижается. В кремнии растворимость водорода незначительна: так в твердом кремнии при 1673 К растворяется 10²⁴ атом/м³ водорода, в жидком – 10²⁵ атом/м³, с увеличением температуры до 1803 К растворимость водорода возрастает до 56 см³/100 г. Однако несмотря на небольшие концентрации водорода в твердом кремнии, добавки последнего оказывают значительное воздействие на газосодержание алюминия. Увеличение содержания кремния при постоянной температуре насыщения водородом в интервале составов, отвечающих области α-твердого раствора, приводит к заметному снижению количества поглощенного водорода [17]. Если содержание водорода

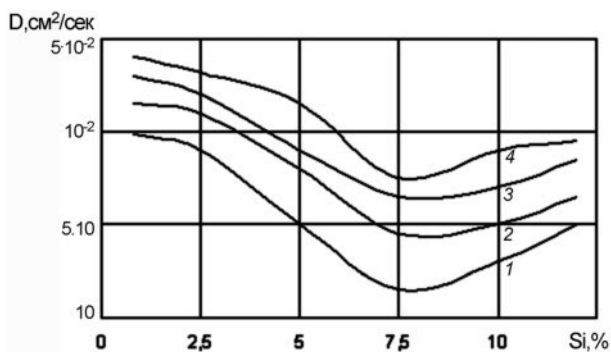


Рис. 1.3. Влияние массовой доли кремния на коэффициент диффузии водорода в алюминии при различных температурах [16]: 1 – 1148 К; 2 – 1073 К; 3 – 1008 К; 4 – 943 К

превышает предел растворимости, то резко повышается абсорбционная способность сплава [17, 18], что сопровождается увеличением газонасыщенности силумина. Такое повышение способности двухфазных сплавов абсорбировать водород связывают с его концентрацией на межфазных границах и с порообразованием вдоль границ зерен в процессе рекристаллизации.

На рис. 1.3 приведены данные, характеризующие изменение эффективного коэффициента диффузии водорода в алюминии и сплавах Al-Si в зависимости от температуры и содержания кремния. В табл. 1.2 представлены данные по содержанию водорода и окиси алюминия в алюминии и сплавах Al-Si.

Кремний способствует образованию газовых пор в отливках, снижая растворимость водорода в алюминии при кристаллизации.

Таблица 1.2. Содержание водорода и оксида алюминия в алюминиевых сплавах [12]

Металл и сплав	Содержание водорода, см³/100г	Доля Al ₂ O ₃ , мас.%
А 00	0,60	0,0010
Al – 1% Si	1,20	0,0012
Al – 2% Si	1,15	0,0015
Al – 5% Si	1,30	0,0040
Al – 9% Si	1,30	0,0180
Al – 11% Si	1,48	0,0230

ции [12]. Образование пористости изучалось на образцах из сплава Al + 8% Si в зависимости от скорости охлаждения при кристаллизации и исходного содержания водорода. Установлено, что пористость линейно убывает с уменьшением его концентрации.

На газонасыщение силуминов оказывает активное влияние контакт шихтовых материалов с газами и водой, тип печи и способ обогрева, температурный режим плавки (перегрев расплава приводит к его наводороживанию [12]), состояние раздаточных ковшей и плавильного инструмента, габаритные размеры шихты.

Модифицирование и легирование сплавов Al-Si, являющиеся необходимыми операциями при получении силумина заданного состава, тоже влияют на газосодержание. Например, натрий – эффективнейший модификатор эвтектики значительно увеличивает вязкость Al-Si расплавов и их газонасыщенность, поскольку содержит водород, попадающий в него при электролизе [9, 12]. Авторы [6] делают вывод, что присутствие в заэвтектическом силумине растворенных газов является основной причиной огрубления структуры и что сама дегазация расплава приводит к восстановлению модифицированной структуры. Добавки магния (до 0,4%), титана (до 0,1%) в сплавы Al-Si несколько снижают водородопроницаемость и коэффициент диффузии водорода. Этого не наблюдается в случае добавления железа (до 0,8%) и бериллия (до 0,1%). Присадки редкоземельных металлов (РЗМ) (лантан, мишметаллы) оказывают существенное влияние на количество газов в силуминах [19]. Так, при введении в сплав АК7ч 0,13% РЗМ количество газов снижается с 0,286 до 0,179 – 0,219 см³/100 г металла, пористость уменьшается от 1,79 до 0,65 – 0,91%. При содержании 0,23% РЗМ количество газов и пористость изменяются незначительно. Дальнейшее повышение содержания РЗМ до 0,34 % сопровождается некоторым увеличением количества газов в металле и его пористости.

Необходимо отметить, что проанализированный в этом весьма кратком обзоре ряд научно-исследовательских и практических работ по влиянию легирующих элементов на свойства сплавов системы алюминий-кремний не дает возможности сделать

вывод, что газосодержание в них рассматривается как один из ведущих факторов, определяющих формирование свойств и, прежде всего, линейного расширения.

1.1.4. Специфика работы поршня и выбор материалов для его изготовления

Усовершенствование двигателей внутреннего сгорания (ДВС) – одна из важнейших проблем при создании нового поколения автотранспортных средств. Поэтому как в отечественном, так и в зарубежном машиностроении ведутся интенсивные исследования в направлении форсирования режимов работы двигателя (что сопровождается ростом давления рабочего цикла и увеличением скоростного режима работы), снижения его удельной металлоемкости и повышения долговечности [20]. К числу наиболее ответственных и напряженных деталей двигателя, в значительной мере влияющих на эксплуатационные характеристики машин, относятся поршни.

Большие динамические нагрузки, высокие температуры и давления, затрудненность осуществления жидкостной смазки – специфические условия работы поршня двигателя. Так, анализ работы поршней тяжело нагруженных двигателей показывает, что в процессе эксплуатации давление газов, воздействующих на поршень, может превышать 8 МПа, а контакт продуктов сгорания топлива, температура которых достигает 2273 К, приводит к разогреву днища поршня до 623–673 К при определенных режимах работы. Различие условий эксплуатации в разных зонах поршня обуславливает и различные требования к поршневым материалам. Так, для «днища» требуется высокая твердость и прочность при температурах до 553–573 К, для «канавок» – высокая износостойкость, твердость и прочность при температурах до 503–533 К, для «бобышек» эти требования включают, прежде всего, высокую прочность и пластичность при температурах до 423–443 К, для «юбки» основное требование – высокая задиростойкость и низкий коэффициент линейного расширения [21].

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Современное состояние и дальнейшее развитие поршневых сплавов на основе системы Al-Si	7
1.1. Структура и свойства силуминов	7
1.1.1. Система алюминий–кремний (двойные сплавы)	7
1.1.2. Легированные силумины	12
1.1.3. Свойства силуминов в зависимости от газосодержания атмосферы	16
1.1.4. Специфика работы поршня и выбор материалов для его изготовления	20
1.1.5. Приработка поршневой группы перед эксплуатацией двигателя	28
Литература	33
2. Генерация концентрированных потоков энергии	35
2.1. Генерация высокоинтенсивных импульсных электронных пучков в системах с плазменным эмиттером	36
2.1.1. Квазистационарная протяженная дуга низкого давления с полым анодом, инициируемая разрядом по поверхности диэлектрика	37
2.1.2. Импульсно-периодическая контрагированная дуга с полым анодом, инициируемая разрядом Пеннинга	54
2.1.3. Управление током разряда источников плазмы	60
2.1.4. Управление током электронного пучка, генерируемого источником с сетчатым плазменным эмиттером	61
2.1.5. Управление длительностью фронта импульса тока пучка	62
2.1.6. Управление распределением плотности тока по сечению пучка	69
2.1.7. Источник электронов на основе контрагированного дугового разряда	70
2.1.8. Сильноточный источник электронов на основе дуги, инициируемой разрядом по поверхности диэлектрика	74

2.1.9. Автоматизированная установка для поверхностной обработки металлических материалов импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности	78
2.1.10. Взаимодействие низкоэнергетических импульсных электронных пучков с поверхностью материалов и изделий	85
2.2. Генерация компрессионных плазменных потоков	87
2.2.1. Параметры плазмы компрессионного потока в газоразрядном магнитоплазменном компрессоре компактной геометрии	94
2.2.2. Квазистационарный сильноточный плазменный ускоритель типа КСПУ П-50М	97
2.2.3. Получение компрессионных эрозионных плазменных потоков	105
2.2.4. Динамика взаимодействия компрессионных плазменных потоков с поверхностью	108
Литература	111
3. Нанокристаллические многофазные структуры, сформированные в поверхностном слое силумина методами электронно-ионно-плазменного воздействия	118
3.1. Структура и свойства силумина эвтектоидного состава, обработанного высокоинтенсивным электронным пучком	119
3.2. Поверхностные сплавы, формирующиеся в системе пленка (титан) / основной металл (силумин) при облучении импульсным электронным пучком	140
3.3. Композитные слои, формируемые при облучении электронным пучком поверхности силумина, обработанного плазмой электрического взрыва проводящих материалов	150
3.4. Формирование методами электронно-пучковой обработки системы сверхтвердое нанокристаллическое покрытие / силумин	182
Литература	206
4. Формирование упрочненных поверхностных слоев с диспергированной структурой в силумине под воздействием компрессионных плазменных потоков	214
4.1. Модификация структуры и свойств поверхностного слоя силумина под воздействием компрессионных плазменных потоков	217
4.2. Формирование поверхностных композитных слоев в силумине при обработке системы металлическое покрытие – силумин компрессионными плазменными потоками	238
4.2.1. Система титан-силумин	242
4.2.2. Система цирконий-силумин	256
4.2.3. Система хром-силумин	268
Литература	279
Сведения об авторах	284