

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **033989**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2019.12.17

(51) Int. Cl. **C22C 21/06 (2006.01)**
C22F 1/047 (2006.01)

(21) Номер заявки
201891097

(22) Дата подачи заявки
2015.11.02

(54) **СВЕРХПЛАСТИЧНЫЙ АЛЮМИНИЕВЫЙ СПЛАВ (ВАРИАНТЫ), ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ И ИЗГОТОВЛЕННОЕ ИЗ НЕГО ИЗДЕЛИЕ**

(43) **2018.12.28**

(56) **US-A-5405462**
US-A1-20140166162

(86) **PCT/RU2015/000731**

(87) **WO 2017/078558 2017.05.11**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:

**АВТОНОМНАЯ
НЕКОММЕРЧЕСКАЯ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ "СКОЛКОВСКИЙ
ИНСТИТУТ НАУКИ И
ТЕХНОЛОГИЙ" (RU)**

(72) Изобретатель:

**Михайловская Анастасия
Владимировна, Котов Антон
Дмитриевич, Портной Владимир
Кимович, Кищик Анна Алексеевна,
Кищик Михаил Сергеевич (RU)**

(74) Представитель:

Нилова М.И. (RU)

(57) Изобретение относится к сверхпластичному алюминиевому сплаву, подходящему для изготовления полуфабрикатов и изделий путем сверхпластичного формования. Предложенный сверхпластичный алюминиевый сплав содержит от 3,3 до 5,9 мас.% магния, от 0,6 до 1,2 мас.% никеля, от 0,4 до 1,2 мас.% железа, от 0,12 до 0,35 мас.% циркония, от 0,03 до 0,4 мас.% хрома, от 0,03 до 0,9 мас.% марганца, где остальное представляет собой алюминий и неизбежные примеси. Согласно одному варианту реализации сплав дополнительно содержит не более 0,5 мас.% скандия. Листы, изготовленные из сплава согласно изобретению, имеют высокоскоростную сверхпластичность при температурах 490-540°C, т.е. относительное удлинение до разрушения по меньшей мере 400% при скорости деформации 10^{-2} с^{-1} , сохраняя при этом прочностные свойства, по меньшей мере, сопоставимые или даже превосходящие свойства известных сверхпластичных Al-Mg сплавов. Изобретение также относится к применению сверхпластичного сплава для изготовления изделий путем сверхпластичного формования и к изделию, изготовленному из указанного сплава.

B1

033989

033989

B1

Область техники

Настоящее изобретение относится к области физической металлургии и к технологиям обработки материалов. В частности, настоящее изобретение относится к сверхпластичным сплавам на основе алюминия с магнием (Mg) в качестве второго основного компонента, которые имеют микроструктуру и предназначены для изготовления материалов с высокими технологическими характеристиками, полуфабрикатов и изделий, полученных путем сверхпластичного формования, для применения в различных отраслях промышленности, включая автомобильную промышленность, аэрокосмическую промышленность, судостроение и другие отрасли промышленности.

Уровень техники

Сверхпластичные сплавы представляют собой металлы с кристаллической структурой, которые могут быть растянуты в несколько раз от их первоначального размера без разрушения при деформации при растяжении при повышенных температурах. При вытяжке под напряжением сверхпластичные сплавы удлиняются и равномерно утоняются вместо образования "шейки" (т.е. местного сужения), приводящего к разрушению. Такие металлы обычно имеют мелкозернистую кристаллическую структуру, как правило, со средним размером частиц менее 10 мкм или еще меньше, что обеспечивает эффект скольжения границ зерен и, тем самым, сверхпластичную деформацию. Такие сплавы применяют в промышленности уже несколько десятилетий, главным образом в автомобильной, авиационной, аэрокосмической и судостроительной промышленности.

Сверхпластичные алюминиевые сплавы обычно содержат значительное количество легирующих элементов, наиболее распространенные из которых представляют собой магний, цинк, медь и литий. Типичные примеры коммерческих сплавов включают AA2004 (Supral 100), высокопрочный алюминиевый сплав 7475 и сплавы Al-Mg серии AA5000. Среди последних один из самых доступных коммерческих сплавов представляет собой AA5083 (Al-4,7Mg-0,86Mn-0,04Cu-0,09Si-0,21Fe-0,05Zn), который имеет относительное удлинение 300-350% при 520-540°C и скорости деформации 10^{-3} с^{-1} , которую считают оптимальной скоростью деформации для указанного сплава. Однако такая скорость деформации недостаточно высока, чтобы обеспечить высокоскоростное сверхпластичное формование, которое было бы востребовано в промышленности. Таким образом, при скоростях деформации 10^{-4} - 10^{-3} с^{-1} , оптимальных для большинства известных Al-Mg сплавов, формование небольшого изделия средней сложности занимает от 20 до 60 мин и более.

В связи с этим предпринимались многочисленные попытки создания сверхпластичного сплава Al-Mg, который был бы способен к высокоскоростному сверхпластичному формованию без потери характеристик относительного удлинения и прочностных свойств. Один из известных сплавов представляет собой Alnovi-1 (Al-4,5Mg-0,7Mn-0,12Cr<0,1Fe-<0,1Si), производимый Furukawa-Sky Aluminium Corp. (JP), который может подвергаться формованию при 10^{-2} с^{-1} , при этом относительное удлинение при указанной скорости деформации составляет 250%. Модификация указанного сплава Alnovi-U (Al-4,75Mg-1,42Mn-0,05Fe-0,03Si) от Furukawa-Sky Aluminium Corp. имеет относительное удлинение 300% при скорости деформации 10^{-2} с^{-1} при 470°C.

Дальнейшие исследования в данной области были сфокусированы на изменении матрицы сплава Al-Mg-Mn за счет различных легирующих элементов, таких как цинк, медь, железо, хром, титан или цирконий, предпочтительно за счет более дешевых элементов. В частности, в EP 0297035 предложен сверхпластичный алюминиевый сплав, содержащий 4,54 мас.% Mg, 1,2 мас.% Fe, 0,24 мас.% Mn, 0,15 мас.% Zr, 0,10 мас.% Si и 0,03 мас.% Ti. При испытании при скорости деформации $0,5 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$ при 490°C указанный сплав имел относительное удлинение 550-585%, однако относительное удлинение при более высоких скоростях деформации не исследовалось.

В заявке на патент Японии № 63G 107815, поданной Kobe Steel LTD, описан сверхпластичный алюминиевый сплав, содержащий 2-5 мас.% Mg, 0,5-3,0 мас.% Fe и один или более элементов, выбранных из 0,05-1,5 мас.% Mn, 0,05-0,5 мас.% Cr, 0,05-0,5 мас.% Zr, 0,05-0,5 мас.% V и <0,15% Ti. Сплав имеет относительное удлинение 500-650% при испытании при скорости деформации $0,5 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ при 500°C; относительное удлинение при более высоких скоростях деформации не исследовалось.

Другой подход был использован в патенте США № 5405462, в котором предложены термически обработанные порошковые композиции, содержащие алюминий в качестве основного элемента и различные легирующие элементы, в том числе Fe, Ni, Mn, Cr, Zr, Zn, Ti, Si, V, мишметаллы и другие металлы в различных комбинациях. Испытуемые сплавы показали весьма хорошие высокоскоростные сверхпластичные свойства (например, относительное удлинение данных сплавов составило 360-1060% при скорости деформации 10^0 с^{-1} при 550°C). Однако процесс получения сплава является настолько сложным, дорогостоящим и долгим, что его вряд ли когда-нибудь реализуют в рамках промышленного крупномасштабного производства.

Таким образом, по-прежнему существует потребность в сверхпластичном алюминиевом сплаве, который был бы способен к высокоскоростной сверхпластичной деформации, сохраняя при этом хорошие характеристики относительного удлинения и прочностные свойства. Эта и другие задачи решены в настоящем изобретении, как более подробно описано ниже.

Краткое описание изобретения

Согласно настоящему изобретению предложен сверхпластичный алюминиевый сплав, обладающий хорошим сверхпластичным удлинением при скорости деформации не более 10 с^{-1} , при этом его прочностные характеристики, по меньшей мере, сопоставимы или даже превосходят характеристики известных сверхпластичных Al-Mg сплавов.

В одном аспекте настоящее изобретение относится к сверхпластичному алюминиевому сплаву, содержащему магний, никель, железо, цирконий, хром и марганец в следующих количествах, мас. %:

Магний	от 3,3 до 5,9
Никель	от 0,6 до 1,2
Железо	от 0,4 до 1,2
Цирконий	от 0,12 до 0,35
Хром	от 0,03 до 0,4
Марганец	от 0,03 до 0,9
алюминий и неизбежные примеси	остальное.

Как неожиданно было обнаружено авторами настоящего изобретения, такой состав сплава обеспечивает улучшенные характеристики высокоскоростной сверхпластичной деформации (СПД). Не желая ограничиваться какой-либо конкретной теорией, авторы настоящего изобретения полагают, что указанные улучшенные характеристики достигаются, по меньшей мере частично, за счет образования конкретной микро/нанозернистой структуры сплава, где микрочастицы и наночастицы диспергированы в алюминиевой матрице. Указанная конкретная структура сплава согласно изобретению характеризуется наличием как крупных, почти глобулярных частиц Al_9FeNi со средним размером частиц от примерно 1 до 2 мкм и объемным содержанием от примерно от 4 до 8 об.%, так и мелкодисперсных частиц $\text{Al}_6(\text{Mn}, \text{Cr})$ и Al_3Zr со средним размером частиц менее примерно 100 нм и объемным содержанием от примерно от 0,3 до 6 об.%. Крупные частицы Al_9FeNi фазы обеспечивают вызванное частицами зарождение центров кристаллизации во время рекристаллизации. Тем самым, благодаря повышенной концентрации дислокаций, создаваемых при деформации в местных участках вблизи крупных частиц, указанные частицы способствуют зарождению новых зерен, тем самым обеспечивая образование более мелкодисперсной зеренной структуры. Дисперсные частицы эффективно стабилизируют рекристаллизованное зерно при высоких температурах. Кроме того, согласно конкретным вариантам реализации при содержании циркония примерно от 0,12 до 0,35 мас. % частицы Al_3Zr подавляют статическую рекристаллизацию, тем самым обеспечивая более мелкие зерна во время СПД.

Следует понимать, что в настоящем изобретении термин "сплав" используют взаимозаменяемо с термином "материал сплава", и соответственно термин "сверхпластичный сплав" используют взаимозаменяемо с термином "материал сверхпластичного сплава".

Согласно конкретным вариантам реализации предложенные материалы сплава обладают по меньшей мере одной из следующих характеристик, измеренных при комнатной температуре: предел текучести от примерно 160 до примерно 250 МПа, предел прочности на растяжение от примерно 300 до 360 МПа и при скорости деформации 10^{-2} с^{-1} и при температуре 490-540°C, сплав обладает относительным удлинением по меньшей мере 430%.

Согласно некоторым вариантам реализации сплавы согласно изобретению дополнительно содержат один или более дополнительных компонентов, выбранных из переходных металлов, которые также называются переходными d-элементами, причем общее количество дополнительного(ых) компонента(ов) составляет не более 0,4 мас.%. Переходные d-элементы имеют d-орбиталь с заполненной электронной оболочкой "n-1" и находятся в группах 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 и 12 Периодической таблицы.

Согласно некоторым предпочтительным вариантам реализации изобретения переходным металлом или переходным d-элементом является скандий, и указанный сплав обладает по меньшей мере одной из следующих характеристик, измеренных при комнатной температуре: предел текучести примерно 255 МПа, предел прочности на растяжение примерно 370 МПа, и при скорости деформации 10^{-2} с^{-1} и температуре 480-500°C сплав имеет удлинение 520%.

В следующем аспекте настоящее изобретение относится к материалу сплава с высокими технологическими характеристиками, изготовленному из заявленного сверхпластичного алюминиевого сплава.

Согласно конкретному варианту реализации материал сплава может быть изготовлен в виде листового изделия. Согласно другому варианту реализации толщина листового изделия составляет от примерно 0,01 до примерно 20 мм. Согласно некоторым вариантам реализации материал сплава может быть также формован на этапе окончательной обработки для получения пластины сплава, проволоки, прутков или изделий любой другой формы с особыми механическими свойствами.

Согласно еще одному аспекту настоящее изобретение относится к применению материала сверхпластичного сплава согласно изобретению для получения различных изделий путем сверхпластичного формования.

Краткое описание чертежей

На фиг. 1 представлено изображение сканирующей электронной микроскопии (SEM), показывающее структуру иллюстративного сплава согласно изобретению:

Сплав № 1 (Al-4,5Mg-1,0Ni-1,0Fe-0,25Zr-0,05Mn-0,05Cr), размер зерна = $5,5 \pm 0,3$ мкм.

На фиг. 2 представлено изображение SEM, показывающее структуру другого иллюстративного сплава согласно изобретению:

Сплав № 2 (Al-4,8Mg-0,9Ni-0,9Fe-0,3Zr-0,05Mn-0,05Cr), размер зерна = $5,0 \pm 0,2$ мкм.

На фиг. 3 представлено изображение SEM, показывающее структуру еще одного иллюстративного сплава согласно изобретению:

Сплав № 3 (Al-5,3Mg-1,0Ni-0,6Fe-0,15Zr-0,6Mn-0,15Cr), размер зерна = $4,8 \pm 0,2$ мкм.

На фиг. 4 представлена фотография двух листов, изготовленных из алюминиевого Сплава № 1 согласно настоящему изобретению, после проведения испытания на способность к формоизменению (метод испытания конус-лунка).

На фиг. 5А представлен график, показывающий давление газа в зависимости от времени в способе испытания по типу конус-лунка.

На фиг. 5В показана фотография конуса, сформованного в методе испытании по типу конус-лунка, на которой показано, как измеряли высоту конуса и толщину конуса.

Подробное описание изобретения

Настоящее изобретение обеспечивает сверхпластичный алюминиевый сплав, имеющий превосходные сверхпластические характеристики при скоростях деформации не более 10^{-1} c^{-1} , при этом обладая прочностными характеристиками, по меньшей мере, сопоставимыми или даже превосходящими характеристики известных сверхпластичных Al-Mg сплавов.

В одном аспекте настоящее изобретение относится к сверхпластичному алюминиевому сплаву, содержащему магний, никель, железо, цирконий, хром и марганец в следующих количествах, мас. %:

магний	от 3,3 до 5,9
никель	от 0,6 до 1,2
железо	от 0,4 до 1,2
цирконий	от 0,12 до 0,35
хром	от 0,03 до 0,4
марганец	от 0,03 до 0,9
алюминий и неизбежные примеси	остальное.

Согласно конкретному варианту реализации изобретения неизбежные примеси выбирают из группы, состоящей из кремния, титана, цинка и меди, и их соответствующие количества, мас. % представляют собой следующие:

кремний	менее 0,16
титан	менее 0,1
цинк	менее 0,1
медь	менее 0,1.

Согласно предпочтительному варианту реализации общее количество неизбежных примесей составляет не более чем 0,3 мас. %.

Материал сплава обладает по меньшей мере одной из следующих характеристик, измеренных при комнатной температуре: предел текучести от примерно 190 до примерно 230 МПа, предел прочности на растяжение от примерно 320 до 330 МПа. При скорости деформации 10^{-2} c^{-1} и температуре 490-540°C материал сплава имеет относительное удлинение по меньшей мере 400%.

Согласно некоторым вариантам реализации предлагаемый сверхпластичный алюминиевый сплав содержит магний, никель, железо, цирконий, хром и марганец в следующих количествах, мас. %:

магний	от 3,9 до 5,3
никель	от 0,6 до 1,0
железо	от 0,6 до 1,0
цирконий	от 0,1 до 0,3
хром	от 0,05 до 0,28
марганец	от 0,05 до 0,75
алюминий и неизбежные примеси	остальное.

Согласно более конкретному варианту реализации количества компонентов сплава представляют собой следующие, мас. %:

магний	4,8
никель	1,0
железо	0,9
цирконий	0,25
хром	0,05
марганец	0,05
алюминий и неизбежные примеси	остальное.

Согласно некоторым вариантам реализации сплав дополнительно содержит один или более дополнительных компонентов, выбранных из переходных металлов или переходных d-элементов, причем общее количество дополнительного(ых) компонента(ов) составляет не более 0,4 мас. %.

Согласно одному из предпочтительных вариантов реализации изобретения переходным металлом или переходным d-элементом является скандий, и сплав обладает по меньшей мере одной из следующих характеристик, измеренных при комнатной температуре:

предел текучести примерно 255 МПа и

предел прочности на растяжение примерно 370 МПа.

При скорости деформации 10^{-2} с^{-1} и температуре 480-500°C указанный сплав имеет относительное удлинение примерно 520%. Примечательно, что данные свойства остаются по существу одинаковыми после проведения общего испытания на коррозию в соответствии со стандартом ASTM G1 10-92.

Структура указанного сплава согласно изобретению состоит из микро- и наночастиц, диспергированных в алюминиевой матрице.

В частности, согласно одному варианту реализации сплав характеризуется присутствием частиц Al_3FeNi околосферической формы со средним размером частиц от примерно 1 до примерно 2 мкм, причем их объемная доля составляет от примерно 2 до примерно 10 об. %, предпочтительно от примерно 4 до примерно 8 об. %; и мелкодисперсных частиц $\text{Al}_6(\text{Mn}, \text{Cr})$ и Al_3Zr со средним размером частиц менее чем примерно 100 нм, причем их объемная доля составляет от примерно 0,1 до примерно 8 об. %, предпочтительно от примерно 0,3 до примерно 6 об. %.

В следующем аспекте настоящее изобретение относится к изделию, изготовленному из предложенного материала из сверхпластичного алюминиевого сплава. В конкретном варианте реализации изобретения изделие представляет собой листовой материал. Согласно другому варианту реализации изобретения толщина листового материала составляет от примерно 0,01 до примерно 20 мм. Согласно еще одному варианту реализации изобретения толщина листового материала составляет от примерно 0,1 до примерно 10 мм. Согласно одному из предпочтительных вариантов реализации изобретения толщина листового материала составляет от примерно 1 до примерно 2 мм.

Согласно другому аспекту настоящее изобретение относится к применению предложенного сверхпластичного сплава для получения изделия путем сверхпластичного формования.

Согласно одному варианту реализации указанное изделие представляет собой компонент транспортного средства. Согласно конкретному варианту реализации компонент указанного транспортного средства представляет собой внутреннюю или внешнюю панель корпуса. Согласно одному варианту реализации указанное транспортное средство представляет собой автомобильное транспортное средство. Согласно другому варианту реализации указанное транспортное средство представляет собой самолет. Согласно еще одному варианту реализации указанное транспортное средство представляет собой космический летательный аппарат.

Согласно еще одному варианту реализации изобретения указанное изделие представляет собой компонент бытовой техники. Согласно другому варианту реализации указанное изделие представляет собой строительный элемент. Согласно конкретному варианту реализации указанный строительный элемент имеет сотовую структуру. Согласно еще одному варианту реализации изобретения указанное изделие представляет собой инструмент. Согласно другому варианту реализации указанное изделие представляет собой ящик.

Указанное изобретение далее проиллюстрировано следующими неограничивающими примерами.

Экспериментальные примеры

Изделие, изготовленное из сплавов согласно настоящему изобретению, было получено в виде листов толщиной 1-2 мм в соответствии со следующей процедурой.

1. Были получены слитки в медном кристаллизаторе с водяным охлаждением, причем скорость охлаждения была установлена равной примерно 15 K/с.
2. Проводили гомогенизационный отжиг при температуре не более 550°C.
3. Проводили горячую прокатку, в ходе которой листы были деформированы от 50 до 70%.
4. Проводили холодную прокатку для получения листов толщиной от 1 до 2 мм (от 50 до 80% де-

формации).

Средний размер рекристаллизованных зерен после нагревания холоднокатаных листов до температуры сверхпластичной деформации 550°C составил $5,0 \pm 0,3$ мкм.

В табл. 1 приведен состав четырех иллюстративных сплавов согласно настоящему изобретению (сплавы 1-4). Структуры сплавов 1-3 показаны на фиг. 1-3 соответственно.

Таблица 1

Химический состав сплавов 1-4 (метод энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии)

Сплав #	Химический состав, мас.%							
	Mg	Mn	Cr	Ni	Fe	Zr	Sc	Al
1	4,8	0,05	0,05	0,9	0,9	0,3	-	основа
2	3,9	0,05	0,05	1,0	1,0	0,25	-	основа
3	5,3	0,6	0,15	1,0	0,6	0,15	-	основа
4	4,8	0,05	0,05	0,9	0,7	0,2	0,2	основа
5	4,8	0,75	0,28	0,6	0,7	0,1	-	основа

Сплав № 1.

Химический состав сплава № 1 представлен в табл. 1. Листы из указанного сплава были получены в соответствии с процедурой, описанной выше. Окончательная толщина листа составила 1,2 мм.

Средний размер рекристаллизованных зерен после нагревания холоднокатаных листов до температуры сверхпластичной деформации 490°C составил $5,5 \pm 0,3$ мкм.

Сверхпластические характеристики сплава № 1:

при скорости деформации $5 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ и температуре 490°C относительное удлинение составило 540% и значение напряжения пластического течения составило 11 МПа;

при скорости деформации $1 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ и температуре 490°C относительное удлинение составило 440% и значение напряжения пластического течения составило 15 МПа;

при скорости деформации $1 \times 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ и температуре 490°C относительное удлинение составило 300% и значение напряжения пластического течения составило 35 МПа.

Механические свойства сплава № 1, измеренные при комнатной температуре, были следующими:

предел текучести составил 220 МПа;

предел прочности на растяжение составил 330 МПа;

относительное удлинение составило 15%.

Сплав № 2.

Химический состав сплава № 2 приведен в табл. 1. Листы из указанного сплава были получены в соответствии с процедурой, описанной выше. Окончательная толщина листа составила 1,2 мм.

Средний размер рекристаллизованных зерен после нагревания холоднокатаных листов до температуры сверхпластичной деформации 490°C составил $5,0 \pm 0,2$ мкм.

Сверхпластические характеристики сплава № 2:

при скорости деформации $5 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ и температуре 490°C относительное удлинение составило 380% и значение напряжения пластического течения составило 15 МПа;

при скорости деформации $1 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ и температуре 490°C относительное удлинение составило 330% и значение напряжения пластического течения составило 19 МПа.

Механические свойства сплава № 2, измеренные при комнатной температуре, были следующими:

предел текучести составил 190 МПа;

предел прочности на растяжение составил 300 МПа;

относительное удлинение составило 18%.

Сплав № 3.

Химический состав сплава № 3 показан в табл. 1. Листы из указанного сплава были получены в соответствии с процедурой, описанной выше. Окончательная толщина листа составила 1,2 мм.

Средний размер рекристаллизованных зерен после нагревания холоднокатаных листов до температуры сверхпластичной деформации 550°C составил $4,8 \pm 0,2$ мкм.

Сверхпластические характеристики сплава № 3:

при скорости деформации $5 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ и температуре 540°C относительное удлинение составило 520% и значение напряжения пластического течения составило 9,7 МПа;

при скорости деформации $1 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ и температуре 540°C относительное удлинение составило 400%

и значение напряжения пластического течения составило 12 МПа.

Механические свойства сплава № 3, измеренные при комнатной температуре, были следующими:
предел текучести составил 200 МПа;
предел прочности на растяжение составил 330 МПа;
относительное удлинение составило 16%.

Сплав № 4.

Химический состав сплава № 4 показан в табл. 1. Листы из указанного сплава были приготовлены в соответствии с процедурой, описанной выше. Окончательная толщина листа составила 2 мм.

Зеренная структура осталась нерекристаллизованной после нагревания холоднокатаных листов до температуры сверхпластичной деформации 500°C.

Сверхпластические характеристики сплава № 4:

при скорости деформации $5 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ и температуре 500°C относительное удлинение составило 600% и значение напряжения пластического течения составило 9,0 МПа;

при скорости деформации $1 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ и температуре 480°C относительное удлинение составило 520% и значение напряжения пластического течения составило 14,0 МПа.

Механические свойства сплава № 4, измеренные при комнатной температуре, были следующими:

предел текучести составил 255 МПа;
предел прочности на растяжение составил 370 МПа;
относительное удлинение составило 16%.

Сплав № 5.

Химический состав сплава № 5 показан в табл. 1. Листы из указанного сплава были приготовлены в соответствии с процедурой, описанной выше. Окончательная толщина листа составила 1,2 мм.

Средний размер рекристаллизованных зерен после нагрева холоднокатаных листов до температуры сверхпластичной деформации 540°C составил $5,5 \pm 0,2$ мкм.

Сверхпластические характеристики сплава № 5:

при скорости деформации $5 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ и температуре 540°C относительное удлинение составило 520% и значение напряжения пластического течения составило 8,0 МПа;

при скорости деформации $1 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ и температуре 540°C относительное удлинение составило 450% и значение напряжения пластического течения составило 11,0 МПа.

Механические свойства сплава № 5, измеренные при комнатной температуре, были следующими:

предел текучести составил 220 МПа;
предел прочности на растяжение составил 340 МПа; и
относительное удлинение составило 15%.

Как видно из приведенных выше экспериментальных данных, сплавы согласно настоящему изобретению обладают отличными свойствами относительного удлинения и прочности при скорости деформации 10^{-2} с^{-1} . Более того, даже при скорости деформации 10^{-1} с^{-1} сплав № 1 имел относительное удлинение 300%, что сравнимо с относительным удлинением известных сплавов при 10^{-3} с^{-1} , т.е. при скорости деформации в 100 раз ниже.

Испытание на способность к формоизменению

Способность к формоизменению сплава согласно изобретению измеряли с использованием метода испытания конус-лунка.

Два образца (Образец № 1 и Образец № 2 в табл. 2), изготовленные из сплава № 1, были изготовлены в виде двух отдельных листов, каждый из которых имел размер $150 \times 150 \times 1,2$ мм. В качестве эталонных образцов использовали три образца, изготовленных из AA5083.

Результаты испытаний показаны в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытание на способность к формоизменению

Образец №	Температура [°C]	Скорость деформации [с ⁻¹]	Высота Конуса Н [мм]	Высота края HR [мм]	Толщина мин t _{мин} [мм]	Толщина края t _R [мм]
Сплав № 1 согласно изобретению						
1	489	0,01	31,1	23,8	0,27	0,51
2	489	0,005	28,8	24,1	0,41	0,54
AA5083						
Эталонный образец 1	552	0,01	22,6	14,3	0,53	0,72
Эталонный образец 2	545	0,001	27,0	23,5	0,50	0,65
Эталонный образец 3	546	0,005	23,9	14,0	0,63	0,75

Как видно из результатов испытаний в табл. 2, сплав согласно настоящему изобретению обладает улучшенной способностью к деформации по сравнению с известным сплавом AA5083.

В табл. 3 представлено дополнительное сравнение сплава согласно изобретению и известного сплава AA5083.

Таблица 3

Характеристики сплава согласно изобретению по сравнению со сплавом AA5083

Сплав	Размер зерна [мкм]	Свойства сверхпластичности			Механические свойства при комнатной температуре после отжига при 500°C (15 мин)		
		Скорость деформации [с ⁻¹]	Относительное удлинение e[%]	Температура формования [°C]	Предел текучести и [МПа]	Предел прочности и на растяжение [МПа]	Относительное удлинение e[%]
AA5083	8,5	1×10 ^{-3*}	300	500-540	160	310	24
Сплав согласно изобретению	5,5	1×10 ^{-2*}	≥400	490-550	210	330	18
		1×10 ⁻¹	300				

* Оптимальная скорость деформации.

Как следует из сравнительных данных в табл. 3, свойства предложенного в настоящем изобретении сплава при 10⁻¹ с⁻¹ сопоставимы со свойствами известного сплава при 1×10⁻³ с⁻¹. Таким образом, заявленный сплав может быть подвергнут сверхпластичному формованию при скорости деформации в 100 раз выше по сравнению с известным сплавом, сохраняя при этом хорошие свойства сверхпластичности и механические свойства, что позволяет значительно сократить продолжительность процесса сверхпластичного формования и, как следствие, снизить затраты на производство сплава.

Таким образом, описав изобретение довольно подробно, следует понимать, что не обязательно строго придерживаться указанных деталей, и специалисты в данной области техники могут предлагать различные изменения и модификации, входящие в объем настоящего изобретения, определенный прилагаемой формулой изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Сверхпластичный алюминиевый сплав, содержащий магний, никель, железо, цирконий, хром и марганец в следующих количествах, мас. %: магний - от 3,3 до 5,9; никель - от 0,6 до 1,2; железо - от 0,4 до 1,2; цирконий - от 0,12 до 0,35; хром - от 0,03 до 0,4; марганец - от 0,03 до 0,9; алюминий и неизбежные примеси - остальное.

2. Сверхпластичный алюминиевый сплав по п.1, содержащий магний, никель, железо, цирконий, хром и марганец в следующих количествах, мас. %: магний - от 3,9 до 5,3; никель - от 0,6 до 1,0; железо - от 0,6 до 1,0; цирконий - от 0,1 до 0,3; хром - от 0,05 до 0,28; марганец - от 0,05 до 0,75; алюминий и неизбежные примеси - остальное.

3. Сверхпластичный алюминиевый сплав по п.1 или 2, отличающийся тем, что неизбежные примеси выбраны из группы, состоящей из кремния, титана, цинка и меди, и содержатся в следующих количествах, мас. %: кремний - менее 0,16; титан - менее 0,1; цинк - менее 0,1; медь - менее 0,1.

4. Сверхпластичный алюминиевый сплав по пп.1-3, отличающийся тем, что общее количество неизбежных примесей составляет не более 0,36 мас. %, предпочтительно не более 0,3 мас. %.

5. Сверхпластичный алюминиевый сплав по любому из пп.1-4, отличающийся тем, что средний размер зерна сплава, измеренный после рекристаллизационного отжига, составляет не более 5,5 мкм.

6. Сверхпластичный алюминиевый сплав по п.5, отличающийся тем, что рекристаллизационный отжиг проводят при температуре от 400 до 600°C, предпочтительно от 490 до 540°C, более предпочтительно при температуре примерно 500°C в течение примерно 15 мин.

7. Сверхпластичный алюминиевый сплав по любому из пп.1-6, отличающийся тем, что структура сплава характеризуется присутствием частиц Al₃FeNi околосферической формы со средним размером частиц от примерно 1 до примерно 2 мкм.

8. Сверхпластичный алюминиевый сплав по п.7, отличающийся тем, что объемная доля частиц Al₃FeNi составляет от примерно 4 до примерно 8 об. %.

9. Сверхпластичный алюминиевый сплав по п.7, отличающийся тем, что структура сплава дополнительно характеризуется присутствием мелкодисперсных частиц Al₆(Mn, Cr) и Al₃Zr со средним размером частиц менее чем примерно 100 нм.

10. Сверхпластичный алюминиевый сплав по п.8, отличающийся тем, что объемная доля мелкодисперсных частиц $Al_6(Mn, Cr)$ и Al_3Zr составляет от примерно 0,3 до примерно 6 об.%.
 11. Сверхпластичный алюминиевый сплав по любому из пп.1-10, отличающийся тем, что указанный сплав обладает по меньшей мере одной из следующих характеристик, измеренных при комнатной температуре:

предел текучести от примерно 160 до примерно 250 МПа и
 предел прочности на растяжение от примерно 300 до 360 МПа.

12. Сверхпластичный алюминиевый сплав по п.11, отличающийся тем, что указанный сплав имеет относительное удлинение более 430% при скорости деформации $0,001-0,01 \text{ с}^{-1}$ и температуре $490-540^\circ\text{C}$.

13. Сверхпластичный алюминиевый сплав по любому из пп.1-12, отличающийся тем, что компоненты сплава содержатся в следующих количествах, мас.%. магний - 4,8; никель - 1,0; железо - 0,9; цирконий - 0,25; хром - 0,05; марганец - 0,05; алюминий и неизбежные примеси - остальное.

14. Сверхпластичный алюминиевый сплав, содержащий магний, никель, железо, цирконий, хром, марганец и скандий в следующих количествах, мас.%. магний - от 3,3 до 5,9; никель - от 0,6 до 1,2; железо - от 0,4 до 1,2; цирконий - от 0,12 до 0,35; хром - от 0,03 до 0,4; марганец - от 0,03 до 0,9; скандий - от 0,05 до 0,50; алюминий и неизбежные примеси - остальное.

15. Сверхпластичный алюминиевый сплав по п.14, содержащий магний, никель, железо, цирконий, хром, марганец и скандий в следующих количествах, мас.%. магний - от 3,9 до 5,3; никель - от 0,6 до 1,0; железо - от 0,6 до 1,0; цирконий - от 0,1 до 0,3; хром - от 0,05 до 0,28; марганец - от 0,05 до 0,75; скандий - от 0,1 до 0,3; алюминий и неизбежные примеси - остальное.

16. Сверхпластичный алюминиевый сплав по п.14 или 15, отличающийся тем, что компоненты сплава содержатся в следующих количествах, мас.%. магний - 4,8; никель - 0,9; железо - 0,7; цирконий - 0,2; хром - 0,05; марганец - 0,05; скандий - 0,2; алюминий и неизбежные примеси - остальное.

17. Сверхпластичный алюминиевый сплав по любому из пп.14-16, отличающийся тем, что указанный сплав обладает по меньшей мере одной из следующих характеристик, измеренных при комнатной температуре:

предел текучести примерно 230-280 МПа и
 предел прочности на растяжение примерно 350-390 МПа.

18. Сверхпластичный алюминиевый сплав по любому из пп.14-17, отличающийся тем, что при скорости деформации $0,005-0,01 \text{ с}^{-1}$ и температуре $480-500^\circ\text{C}$ указанный сплав имеет относительное удлинение более 540%.

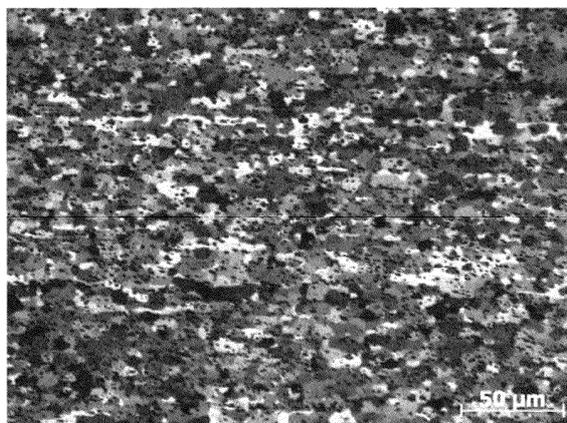
19. Изделие, изготовленное из сверхпластичного алюминиевого сплава по любому из пп.1-18.

20. Изделие по п.19, отличающееся тем, что указанное изделие представляет собой листовой материал.

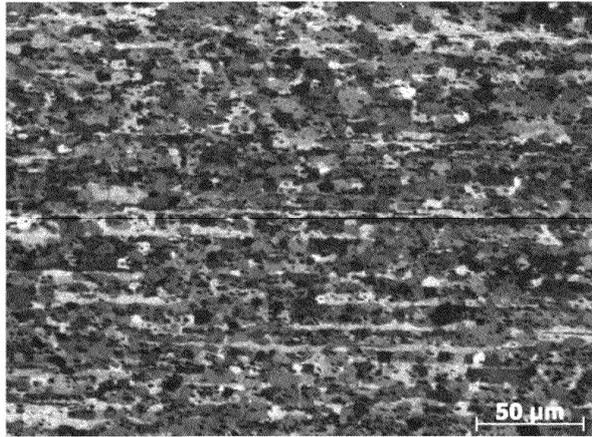
21. Изделие по п.20, отличающееся тем, что толщина листового материала составляет от примерно 0,1 до примерно 10 мм.

22. Изделие по п.21, отличающееся тем, что толщина листа составляет от примерно 1 до примерно 2 мм.

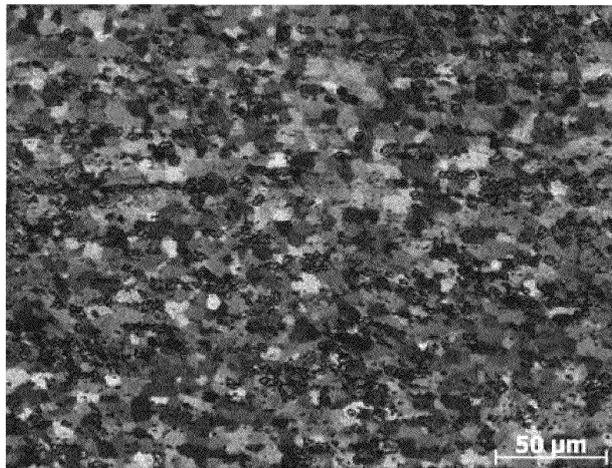
23. Применение сверхпластичного алюминиевого сплава по любому из пп.1-18 для получения изделия путем сверхпластичного формования.



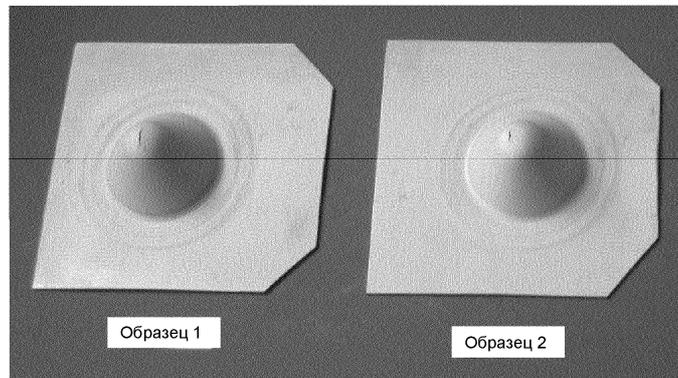
Фиг. 1



Фиг. 2

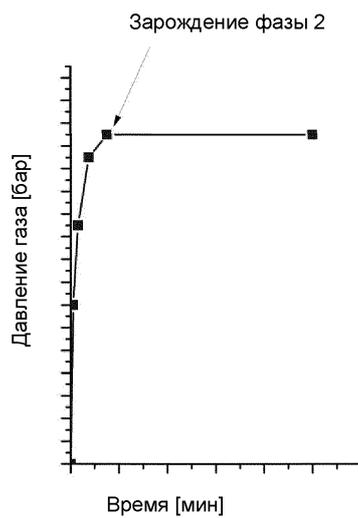


Фиг. 3

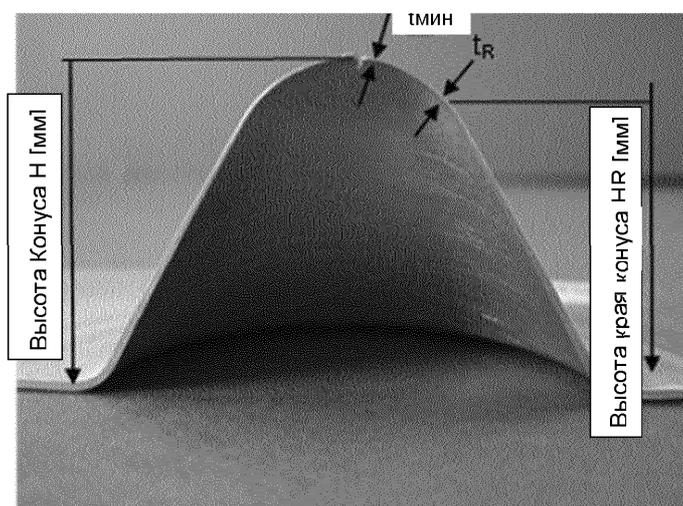


Образец № 1 (слева) и № 2 (справа) сплава №1 после испытания на способность к формоизменению

Фиг. 4



Фиг. 5А



Фиг. 5В