РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 467 090** (13) **C1**

(51) МПК
C22F 1/04 (2006.01)
C22F 1/06 (2006.01)
B82B 3/00 (2006.01)
B21J 5/00 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: **2011138667/02, 20.09.2011**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
20.09.2011

Приоритет(ы):
(23) Дата поступления дополнительных материалов к ранее поданной заявке:
08.06.2011, 2009147854 22.12.2009

(45) Опубликовано: **20.11.2012** Бюл. № **32**

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2351686 C2, 10.04.2009. RU 2334582 C2, 27.09.2008. US 2003052000 A1, 20.03.2003. KR 100768568 B1, 19.10.2007. US 2007084527 A1, 19.04.2007.**

Адрес для переписки:
603950, Нижегородская обл., г.Нижний Новгород, ГСП-20, пр. Гагарина, 23, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, патентно-лицензионный отдел

(72) Автор(ы):
Чувильдеев Владимир Николаевич (RU),
Нохрин Алексей Владимирович (RU),
Москвичева Анна Владимировна (RU),
Лопатин Юрий Геннадьевич (RU),
Баранов Глеб Викторович (RU),
Белов Владимир Юрьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского" (RU)

(54) СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ ИЛИ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ С НАНО- И СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ И ИЗДЕЛИЯ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ ИЗ ЭТИХ СПЛАВОВ (ВАРИАНТЫ)

(57) Реферат:

Изобретение относится к области металлургии, в частности к технологии термомеханической обработки алюминиевых или магниевых сплавов при получении из них изделий с нано- и микрокристаллической структурой. Заявлены способ изготовления изделий из алюминиевых или магниевых сплавов с нано- и субмикрокристаллической структурой и изделия, полученные этим способом. Способ включает предварительное равноканальное угловое прессование сплавов и последующее деформационное формообразование из них изделий. Равноканальное угловое прессование сплавов проводят со скоростью и температурой деформации, выбираемыми в зависимости от состава сплавов по заданному соотношению, а деформационное формообразование проводят штамповкой при комнатной температуре со скоростью деформации, выбираемой в зависимости от состава сплавов по заданному соотношению. Технический результат - повышение технологичности, а также прочности и пластичности сплавов при изготовлении из них изделий. 3 н. и 6 з.п. ф-лы, 2 ил., 1 табл.

RU 2467090 C1

RU 2467090 C1

RUSSIAN FEDERATION

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(19) **RU** (11) **2 467 090** (13) **C1**

(51) Int. Cl.
C22F 1/04 (2006.01)
C22F 1/06 (2006.01)
B82B 3/00 (2006.01)
B21J 5/00 (2006.01)

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(21)(22) Application: **2011138667/02, 20.09.2011**

(24) Effective date for property rights:
20.09.2011

Priority:
(23) Date of filing the supplementary materials of the earlier submitted application: **08.06.2011, 2009147854 22.12.2009**

(45) Date of publication: **20.11.2012 Bull. 32**

Mail address:
603950, Nizhegorodskaja obl., g.Nizhnij Novgorod, GSP-20, pr. Gagarina, 23, Nizhegorodskij gosudarstvennyj universitet im. N.I. Lobachevskogo, patentno-litsenzionnyj otdel

(72) Inventor(s):
Chuvil'deev Vladimir Nikolaevich (RU),
Nokhrin Aleksej Vladimirovich (RU),
Moskvicheva Anna Vladimirovna (RU),
Lopatin Jurij Gennad'evich (RU),
Baranov Gleb Viktorovich (RU),
Belov Vladimir Jur'evich (RU)

(73) Proprietor(s):
Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija "Nizhegorodskij gosudarstvennyj universitet im. N.I. Lobachevskogo" (RU)

(54) METHOD OF PRODUCING ARTICLES FROM ALUMINIUM OR MAGNESIUM ALLOYS WITH NANO- AND SUB MICRO CRYSTALLINE STRUCTURE, AND ARTICLES MADE THEREOF (VERSIONS)

(57) Abstract:

FIELD: metallurgy.

SUBSTANCE: invention relates to metallurgy, particularly, to producing articles from aluminium or magnesium alloys with nano- and sub micro crystalline structure, and articles made thereof. Proposed method comprises preliminary equal-channel angular pressing and subsequent strain-forming of articles thereof. Said equal-channel angular pressing is performed at deformation temperature and rate selected subject to alloy composition by preset relation while strain-forming is carried out by extrusion at room temperature and deformation rate selected subject to alloy composition by preset relation.

EFFECT: better manufacturability, higher strength and ductility.

9 cl, 2 dwg, 1 tbl

RU 2467090 C1

RU 2467090 C1

Группа изобретений относится к области металлургии цветных сплавов, в частности к технологии термомеханической обработки алюминиевых и магниевых сплавов, обеспечивающей формирование их нано- и микрокристаллической зеренной структуры, характеризующейся одновременным повышением пластичности и прочности указанных сплавов, при получении из них изделий сложной формы с улучшенными механическими свойствами.

Традиционная технология изготовления изделий из рассматриваемых цветных сплавов представляет собой усложненный комплекс производственных операций по термомеханической обработке этих сплавов в связи с противоречащими друг другу задачами повышения пластических свойств заготовок из указанных сплавов, необходимых для формовки деталей сложной формы, и обеспечения высокой прочности материала изделий на выходе.

Так, известны многостадийные термомеханические обработки сплавов на алюминиевой (см. патент США №4092181, C22F 1/04, 1978) и магниевой (см. авторское свидетельство СССР №1033569, C22F 1/06, 1983) основах, основным недостатком которых являются большая продолжительность технологического цикла (в обоих аналогах) при недостаточно оптимальном сочетании достигаемых механических свойств (пластичности и прочности) сплавов (низкой пластичности во втором аналоге).

Некоторое улучшение технологичности за счет снижения числа операций термомеханической обработки при изготовлении изделий с повышенными прочностными свойствами из алюминиевых и магниевых сплавов достигнуто в известных способах: способе получения листов из высокопрочных алюминиевых сплавов с высокими показателями пластичности, обеспечивающими получение листовых деталей сложной формы в качестве силовых элементов типа жесткостей с ребрами и других подобных деталей (см. патент РФ №2246555, C22F 1/053, 2005), или способе получения заготовок из магниевых сплавов, обладающих повышенными прочностными и приемлемыми пластическими свойствами, достаточными для изготовления деформированных полуфабрикатов, предназначенных для изделий авиакосмической техники и машиностроения (см. патент РФ №2213800, C22F 1/06, 2003).

Однако оба данных аналога также недостаточно эффективны с точки зрения производственных возможностей и достигаемых механических свойств (пластичности и прочности) сплавов.

В первом аналоге, представляющем собой получение слитка из высокопрочного алюминиевого сплава системы Al-Zn-Mg-Cu-Zr и деформацию слитка путем горячей прокатки при температуре 370-450°C до изготовления прессованной полосы с коэффициентом вытяжки не менее 8 и холодную прокатку полосы со степенью деформации не менее 30%, при достижении сочетания высоких пластичности и прочности (относительное удлинение - 11% и предел прочности - 625 МПа) технологические условия их достижения характеризуются производственно проигрышно с точки зрения затратного используемого производственного оборудования и относительно высокой температуры горячей прокатки (не менее 370°C) для формирования нерекристаллизованной структуры с размером субзерна менее 3 мкм.

Во втором аналоге, представляющем собой нагрев до 280-420°C литого магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr перед каждым переходом ступенчатой деформации с суммарной степенью деформации 94,0-99,5%, после которой охлаждение сплава на

воздухе и его окончательный нагрев до 370-420°С в изотермических условиях и проведение окончательной деформации со скоростью $1 \cdot 10^{-4}$-$2 \cdot 10^{-2}$ $с^{-1}$ при достижении предела прочности 239 МПа и удовлетворительного уровня пластичности (относительное удлинение - 18,2% - см. патент РФ №2148104, С22F 1/06, 2000 - прототип для второго аналога с выходной пластичностью сплава на уровне пластичности сплава во втором аналоге), технологические условия их достижения также характеризуются производственно проигрышно с точки зрения ступенчатых режимов обработки и относительно высокой температуры нагрева (интервал 280-420°С) при недостаточно оптимальном сочетании механических свойств (с недостаточно высокой прочностью и пластичностью).

Из наиболее близких по технической сущности аналогов в качестве прототипов для заявляемой группы изобретений заявляемых способа и вариантов изделий выбраны способ, характеризующийся одновременным повышением пластичности и прочности литого сплава на основе магния, содержащего 0,49% Al и 0,47% Ca при изготовлении из него различных авиадеталей, колес и вилок шасси и др., в частности одновременным обеспечением повышенной пластичности (относительное удлинение - 12%) и повышенной прочности (предел текучести 180 МПа) сплава в результате предварительной гомогенизации сплава при температуре 415-520°С в течение 4-24 ч с последующей экструзией при температуре 300-450°С со степенью вытяжки 7-18 и его равноканального углового прессования при температуре 250-320°С с истинной степенью деформации 6-8 перед деформационным формообразованием деталей, и изделия, представляющие собой заготовки под последующее формообразование деталей, полученные изложенным способом (см. патент РФ №2351686, С22F 1/06, B21J 1/06, B21J 5/00, B21J 5/06, B21C 23/00, 2009).

Указанные прототипы также имеют недостаток, заключающийся в не реализованном в них (для прототипа заявляемого способа) резерве сокращения операций термомеханической обработки легких цветных сплавов, улучшения технологии интенсивного пластического деформирования сплавов (снижения температуры деформирования при равноканальном угловом прессовании) и (для прототипа для заявляемых изделий) резерве оптимизации достигаемого сочетания механических свойств (в частности, для магниевых сплавов - повышения пластичности сплавов).

Технический результат заявляемой группы изобретений - повышение технологичности одновременного достижения повышенной прочности и пластичности алюминиевых и магниевых сплавов при изготовлении из них изделий с высокими механическими свойствами за счет улучшения технологических требований к режимным условиям интенсивного пластического деформирования сплавов (снижения температуры деформирования при равноканальном угловом прессовании) при обеспечении выигрышного сочетания механических свойств (в частности, значительного повышения пластичности при высокой прочности сплавов), а также создание нормированной технологической базы, унифицированной для различных групп алюминиевых и магниевых сплавов при производственной отработке оптимальных режимов предварительного равноканального углового прессования сплавов для достижения указанного выигрышного сочетания механических свойств и последующего деформационного формообразования высокопрочных изделий.

Для достижения указанного технического результата в способе изготовления изделий из алюминиевых или магниевых сплавов с нано- и субмикрокристаллической структурой, включающем предварительное равноканальное угловое прессование

сплавов и последующее деформационное формообразование из них изделий, равноканальное угловое прессование сплавов проводят со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_{РКУП} = 0{,}4\ мм/сек$ и температурой деформации $T_{РКУП}$, выбираемой в интервале 150-275°С в зависимости от состава сплавов по следующему соотношению:

$$T_{РКУП} = -\left(\frac{Q_b^*}{kT_m}\right)\frac{T_m}{\ln\left[\frac{1}{D_{b0}^*}\frac{\dot{\varepsilon}_D^{7/2}}{\dot{\varepsilon}_{РКУП}^{5/2}}\left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^{35/4}\right]}, \qquad (1)$$

где T_m - абсолютная температура плавления сплавов (К);

k - постоянная Больцмана (Дж/К);

Q_b^* - энергия активации диффузии по неравновесным границам зерен (величина выражена через kT_m);

D_{b0}^* - предэкспоненциальный множитель коэффициента диффузии по неравновесным границам зерен ($м^2/с$);

$\dot{\varepsilon}_D$ - скорость внутризеренной деформации ($с^{-1}$);

Z_1 и Z_2 - расчетные модельные параметры неравновесного состояния структуры сплавов после равноканального углового прессования, зависящие от их химического и фазового состава, при этом для алюминиевых сплавов $Z_1=3{,}0\cdot10^{-4}$ $м^{3/7}$ и $Z_2=9{,}01$ $м^{1/5}$, а для магниевых сплавов $Z_1=4{,}24\cdot10^{-4}$ $м^{3/7}$ и $Z_2=9{,}18$ $м^{1/5}$;

а деформационное формообразование проводят штамповкой сплавов при комнатной температуре со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_v$, выбираемой в интервале $0{,}3\cdot10^{-3}$-0,3 $с^{-1}$ в зависимости от состава сплавов по следующему соотношению:

$$\dot{\varepsilon}_v \le Z_3\frac{D_b^*}{d^{5/2}}, \qquad (2)$$

где D_b^* - коэффициент диффузии по неравновесным границам зерен ($м^2/с$);

d - размер зерна сплавов после равноканального углового прессования (м);

Z_3 - расчетный модельный параметр состояния нано- и субмикрокристаллической структуры сплавов после штамповки, зависящий от их химического и фазового состава, при этом для алюминиевых сплавов $Z_3=6{,}97\cdot10^{-8}$ $м^{3/2}$, а для магниевых сплавов $Z_3=8{,}19\cdot10^{-8}$ $м^{3/2}$.

При изготовлении изделий из сплава АМг6 системы Al-Mg-Mn равноканальное угловое прессование проводят при общем числе циклов прессования, равном шести, со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_{РКУП} = 0{,}4$ мм/с при температуре деформации $T_{РКУП}$= 200°С, а штамповку - со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_v = 10^{-2}$ $с^{-1}$ при комнатной температуре.

При изготовлении изделий из сплава МА14 системы Mg-Al-Zn-Mn равноканальное угловое прессование проводят при общем числе циклов прессования, равном шести, со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_{РКУП} = 0{,}4\ мм/сек$ при температуре деформации $T_{РКУП}$= 275°С, а штамповку - со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_v = 3\cdot10^{-3}$ $с^{-1}$ при комнатной температуре.

Для обеспечения микроструктурных условий стабильного изготовления изделий с высокими механическими свойствами из алюминиевых и магниевых сплавов после равноканального углового прессования сплавы отжигают при температуре,

выбираемой в интервале 100-300°С в зависимости от их марки.

Изделие с высокими механическими свойствами (по первому варианту), изготовленное из алюминиевых или магниевых сплавов с нано- и субмикрокристаллической структурой заявляемым способом после равноканального углового прессования сплавов со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_{РКУП} = 0{,}4\ мм/сек$ и температурой деформации $T_{РКУП}$, уточненной в интервале 150-275°С с помощью первой предложенной формулы, и штамповки сплавов при комнатной температуре со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_{\nu}$, выбранной в интервале $0{,}3 \cdot 10^{-3}$-0,3 $с^{-1}$ с помощью второй предложенной формулы, имеет сплав с микроструктурой со средним размером зерна 0,4-2,0 мкм, характеризующейся в зависимости от марки сплава пределом прочности 260-450 МПа и относительным удлинением 20-65%.

В частности, изделие, изготовленное из алюминиевого сплава АМг6, после равноканального углового прессования при общем числе циклов прессования, равном шести, со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_{РКУП} = 0{,}4$ мм/с при температуре деформации $T_{РКУП}$=200°С имеет сплав с микроструктурой со средним размером зерна 0,5 мкм, характеризующейся пределом прочности 440 МПа и относительным удлинением 28%.

Изделие, изготовленное из магниевого сплава МА14, после равноканального углового прессования при общем числе циклов прессования, равном шести, со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_{РКУП} = 0{,}4$ мм/с при температуре деформации $T_{РКУП}$=275°С имеет сплав с микроструктурой со средним размером зерна 2,0 мкм, характеризующейся пределом прочности 280 МПа и относительным удлинением 58%.

А также изделие, изготовленное из магниевого сплава МА2-1, после равноканального углового прессования при общем числе циклов прессования, равном шести, со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_{РКУП} = 0{,}4$ мм/с при температуре деформации $T_{РКУП}$=250°С имеет сплав с микроструктурой со средним размером зерна 1,5 мкм, характеризующейся пределом прочности 325 МПа и относительным удлинением 65%.

Изделие с высокими механическими свойствами (по второму варианту), изготовленное из алюминиевого сплава АМг6 заявляемым способом после равноканального углового прессования при общем числе циклов прессования, равном шести, со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_{РКУП} = 0{,}4$ мм/с при температуре деформации $T_{РКУП}$=200°С и отжига при температуре 300°С имеет сплав с микроструктурой со средним размером зерна 5,4 мкм, характеризующейся пределом прочности 350 МПа и относительным удлинением 58%.

На фиг.1 представлена микрокристаллическая структура образца сплава АМг6 заявляемого изделия (по первому варианту) после равноканального углового прессования при общем числе циклов прессования, равном шести, со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_{РКУП} = 0{,}4$ мм/с при температуре деформации $T_{РКУП}$=200°С (атомно-силовая микроскопия); на фиг.2 - микрокристаллическая структура образца сплава АМг6 заявляемого изделия (по второму варианту) после равноканального углового прессования этого сплава при общем числе циклов прессования, равном шести, со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_{РКУП} = 0{,}4$ мм/с при температуре деформации $T_{РКУП}$=200°С и последующего отжига при температуре 300°С (растровая электронная микроскопия).

Предлагаемый способ изготовления изделий из алюминиевых или магниевых сплавов с нано- и субмикрокристаллической структурой осуществляют следующим образом.

Исходные крупнокристаллические слитки (с исходным размером зерна 20-100 мкм)

размером 22×22×165 мм, например из алюминиевого сплава АМг6, подвергают шести циклам прессования в инструменте с углом пересечения рабочего и выходного каналов 90° на установке для равноканального углового прессования по маршруту B_C (заготовку перед каждым повторным циклом поворачивают на угол 90° вокруг своей продольной оси) со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_{РКУП} = 0,4$ мм/с при температуре деформации $T_{РКУП}$=200°С и затем производят штамповку со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_{ш} = 10^{-2}$ с$^{-1}$ при комнатной температуре с указанными $T_{РКУП}$ и $\dot{\varepsilon}_{ш}$, уточненными с помощью соотношений (1) и (2) на основе величин модельных параметров для алюминиевых сплавов Z_1=3,0·10^{-4} м$^{3/7}$, Z_2=9,01 м$^{1/5}$ и Z_3=6,97·10^{-8} м$^{3/2}$.

Приведенный в качестве примера алюминиевый сплав после указанного равноканального углового прессования имеет перед штамповкой субмикрокристаллическую структуру, характеризующуюся средним размером зерна 0,5 мкм (см. фиг.1) при относительном удлинении 28% и пределе прочности 440 МПа (результат механических испытаний при комнатной температуре и скорости деформации 10^{-2} с$^{-1}$).

Такой же сплав после указанного равноканального углового прессования и отжига при температуре 300°С имеет перед штамповкой микрокристаллическую структуру, характеризующуюся средним размером зерна 5,4 мкм (см. фиг.2) при относительном удлинении 58% и пределе прочности 350 МПа (результат механических испытаний при комнатной температуре и скорости деформации 10^{-2} с$^{-1}$).

Данные о параметрах структуры получены с использованием методов атомно-силовой и растровой электронной микроскопии (универсальный атомно-силовой микроскоп «Accurex TMX-2100» и растровый электронный микроскоп Jeol JSM-6490 с рентгеновским микроанализатором INCA 350). А данные о механических свойствах изделий получены с использованием стандартных методов механических испытаний с использованием универсальной разрывной машины «Tinus Olsen H25K-S».

Для подтверждения режимного обеспечения одновременного повышения прочности и пластичности в соответствии с предлагаемым способом такой же образец алюминиевого сплава подвергали изложенной обработке со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_{РКУП} = 0,4$ мм/сек (базовой с точки зрения технических возможностей применяемой установки для равноканального углового прессования) при температуре деформации $T_{РКУП}$=200°С с ее изменением в сторону уменьшения и увеличения от уточненной величины на 25% (в результате микрокристаллическая структура образца изменяла средний размер зерна на величину, составляющую от 20 до 100% от полученного, и характеризовалась уменьшением относительного удлинения в среднем на 15-20% от своего максимального значения).

Уточняемые скорости деформации $\dot{\varepsilon}_{ш}$ последующей штамповки в соответствии с заявляемым способом составили для алюминиевых и магниевых сплавов интервал величин: 0,3·10^{-3}-0,3 с$^{-1}$ (в частности, для сплава АМг6 - 10^{-2} с$^{-1}$, а для сплава МА14 - 3·10^{-3} с$^{-1}$), экспериментально подтвержденных в скоростном режиме испытаний образцов широкой группы алюминиевых и магниевых сплавов на механические свойства, соответствующем оптимальным скоростям штамповки, характеризующимся незначительным снижением пластичности получаемых изделий (в пределах ~10-15%).

Изделия, изготовленные из алюминиевых или магниевых сплавов с нано- и субмикрокристаллической структурой заявляемым способом, приобретали после штамповки микроструктуру сплава со средним размером зерна 0,4-2,0 мкм,

характеризующуюся в зависимости от марки сплава пределом прочности 260-450 МПа и относительным удлинением 20-65%.

Предлагаемый интервал температур отжига сплава изделий 100-300°С перед штамповкой определился условиями стабилизации механических свойств цветных (алюминиевых и магниевых) сплавов в результате протекания диффузионно-контролируемых процессов возврата и рекристаллизации с сохранением мелкозернистости структуры сплава (см., например, статью Чувильдеева В.Н. и др. Механические свойства микрокристаллического алюминиевого сплава АМг6. - Физика твердого тела. Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского. 2008, №4, с.35-42).

Примеры уточнения температуры деформации $T_{РКУП}$ по заявляемому способу для основных групп цветных сплавов изделий по первому варианту (без отжига):

Алюминиевые сплавы -

характеристики сплава АМг6 перед штамповкой при и $T_{РКУП}$=200°С - средний размер зерна 0,4-0,5 мкм, относительное удлинение 20-28% и предел прочности 430-450 МПа (результат механических испытаний на разрыв указанного сплава при комнатной температуре и скорости деформации 10^{-2} $с^{-1}$).

Магниевые сплавы -

характеристики сплава МА14 перед штамповкой при $\dot{\varepsilon}_{РКУП} = 0{,}4\ мм/сек$ и $T_{РКУП}$=275°С - средний размер зерна 2,0 мкм, относительное удлинение 58% и предел прочности 280 МПа (результат испытания на разрыв указанного сплава при комнатной температуре и скорости деформации $3\cdot10^{-3}$ $с^{-1}$);

характеристики сплава МА2-1 перед штамповкой при $\dot{\varepsilon}_{РКУП} = 0{,}4\ мм/сек$ и $T_{РКУП}$=250°С - средний размер зерна 1,5 мкм, относительное удлинение 65% и предел прочности 325 МПа (результат испытания на разрыв указанного сплава при комнатной температуре и скорости деформации $3\cdot10^{-3}$ $с^{-1}$).

Основой для выведения предлагаемых соотношений (1) и (2) послужили модельные дисперсионные и диффузионно-энергетические условия состояния границ зерен при интенсивной пластической деформации, определяемые следующими условиями теории неравновесных границ зерен (см. статью Чувильдеева В.Н. и Копылова В.И. Предел измельчения зерен при РКУ-деформации. - Известия РАН. Металлы, 2004, №1, с.22-35):

условие на минимальный размер фрагмента d* - предел диспергирования -

$$(d^*)^{3,5} \geq \chi \frac{K}{G} \frac{\delta_b D_b^*}{A_1 \xi_1 \dot{\varepsilon}_D} \frac{G\Omega}{kT}, \qquad (3)$$

где χ - геометрический коэффициент (безразмерная величина);

K - коэффициент Холла-Петча (МПа·$м^{1/2}$);

G - модуль сдвига (МПа);

δ_b - ширина границы (δ_b=2b);

b - вектор Бюргерса (м);

D_b^* - коэффициент диффузии по неравновесным границам зерен ($м^2$/с);

A_1 - численный параметр (безразмерная величина);

ξ_1 - коэффициент однородности пластической деформации (безразмерная величина);

$\dot{\varepsilon}_D$ - скорость внутризеренной деформации ($с^{-1}$);

Ω - атомный объем (величина выражена через 10^{-28} $м^3$);

k - постоянная Больцмана (Дж/К);

Т - температура интенсивной пластической деформации (К);

условие на оптимальный размер зерна d_m:

$$\frac{d_m}{b}=\left[\frac{1}{\sqrt{2}\xi_3}\frac{G\Omega}{kT}\frac{D_b^*\delta}{b^3}\frac{C_1}{\xi_2}\frac{1}{\dot{\varepsilon}_D}\right]^{2/5}, \qquad (4)$$

где C_1 и ξ_2 - численные безразмерные коэффициенты в выражении для времени диффузионного ухода скользящих компонент делокализованных дислокаций;

ξ_3 - численный безразмерный коэффициент, зависящий от геометрических параметров границ и стыков зерен, а также от геометрии потоков дислокаций в соседних зернах;

и условие на оптимальную скорость деформации, при которой реализуется эффект одновременного повышения прочности и пластичности заготовок из цветных сплавов при комнатной температуре:

$$(\dot{\varepsilon}_v^w)_{max}=\frac{1}{\sqrt{2}\xi_3}\left(\frac{b}{d}\right)^{5/2}\left(\frac{G\Omega}{kT}\right)\frac{\delta D_6^*}{b^3}\frac{C_1}{\xi_2}, \qquad (5)$$

Выражение (1) выводится путем приравнивания выражений (3) и (4) при:

$$Z_1=\left[\chi\frac{K}{G}\frac{\delta}{A_1\xi_3}\frac{G\Omega}{kT}\right]^{2/7}, \qquad (6)$$

$$Z_2=b\left[\frac{C}{\sqrt{2}\xi_2\xi_3}\frac{G\Omega}{kT}\frac{\delta}{b^3}\right]^{2/5}, \qquad (7)$$

Выражение (2) получается из выражения (5) при:

$$Z_3=\frac{\sqrt{2}C_1}{\xi_2\xi_3}\frac{G\Omega}{kT}b^{3/2}, \qquad (8)$$

При расчете с помощью выражений (6), (7) и (8) получены величины вышеуказанных Z_1, Z_2 и Z_3, и при расчете с помощью выражений (1) и (2) получены соответственно температура деформации для алюминиевого сплава АМг6 $T_{РКУП}$= 200°С и для магниевого сплава МА14 $T_{РКУП}$=275°С и скорость деформации для алюминиевого сплава АМг6 $\dot{\varepsilon}_v=10^{-2}\ с^{-1}$ и для магниевого сплава МА14 $\dot{\varepsilon}_v=3\cdot10^{-3}\ с^{-1}$ при исходных параметрах указанных сплавов, приведенных в следующей таблице.

Наименование	Обозначение	Величина	
		Алюминиевый сплав АМг6	Магниевый сплав МА14
Кристаллогеометрические параметры			
Вектор Бюргерса	b	$2.86\cdot10^{-10}$ м	$3.21\cdot10^{-10}$ м
Ширина границы зерна	δ_b	$5.72\cdot10^{-10}$ м	$6.42\cdot10^{-10}$ м
Размер зерна	d	$1\cdot10^{6}$ м	$2\cdot10^{-6}$ м
Атомный объем	Ω	$1.66\cdot10^{-29}$ м^3	$2.33\cdot10^{-28}$ м^3
Диффузионные параметры			
Предэкспоненциальный множитель коэффициента диффузии в равновесной границе зерна	$\delta_b D_{b0}$	$5.0\cdot10^{-14}$ м^2/с	$5.0\cdot10^{-12}$ м^2/с
Энергия активации диффузии в равновесной границе зерна	Q_b	10.8 kT_m	12.0 kT_m
Предэкспоненциальный множитель коэффициента диффузии в неравновесной границе зерна	D_{b0}^*	$7.97\cdot10^{-7}$ м^2/с	$1.33\cdot10^{-6}$ м^2/с
Энергия активации диффузии в неравновесной границе зерна	Q_b^*	8.4 kT_m	8.0 kT_m
Термодинамические и упругие константы			

Удельная теплота плавления	λ	$\lambda\rho b^3 / kT_m = 1.38$	
Плотность	ρ		
Модуль сдвига	G	25 400 МПа	16 600 МПа
Температура плавления	T_m	933 K	924 K
Константа материала	Z_1	$3.0 \cdot 10^{-4}$ м$^{3/7}$	$4.24 \cdot 10^{-4}$ м$^{3/7}$
	Z_2	9.01 м$^{1/5}$	9.18 м$^{1/5}$
	Z_3	$6.97 \cdot 10^{-8}$ м$^{3/2}$	$8.19 \cdot 10^{-8}$ м$^{3/2}$
Коэффициент Холла-Петча	K	0.1 МПа·м$^{1/2}$	0.3 МПа·м$^{1/2}$
Безразмерный геометрический коэффициент	χ	1	
Коэффициенты однородности пластической деформации	$\xi_{1,2}$	0,01	
Численный коэффициент	ξ_3	0,05	
Численный коэффициент	A_1	10	
Численный коэффициент	C_1	50	

При проведении указанных расчетов использовались соотношения теории неравновесных границ зерен (см. указанную выше статью Чувильдеева В.Н. и др.):

$$D_b^* = D_{b0}^* \exp(Q_b^*/kT_m), \qquad (9)$$

$$\dot{\varepsilon}_D = \xi_1 \dot{\varepsilon}_v, \qquad (10)$$

Промышленным значением заявляемого способа является предлагаемая обработка цветных сплавов с режимом ее проведения, оптимизированным с помощью модельных представлений о механизмах прочности и пластичности на микроструктурном уровне, позволяющих с помощью соотношений (1) и (2) уточнить температурно-скоростные условия для технологического обеспечения одновременного повышения прочности и пластичности легких цветных сплавов при деформационном измельчении их зерен методом интенсивного пластического деформирования сплавов по технологии равноканального углового прессования и предложить нанотехнологическое решение оптимального формирования структуры цветных сплавов с улучшенными механическими свойствами.

В результате создана возможность обеспечения одновременного повышения прочности и пластичности широкой группы цветных сплавов на уровне высоких величин предела прочности и относительного удлинения в процессе штамповки при комнатной температуре высокопрочных и высокопластичных изделий, характеризующаяся минимизацией производственно-исследовательских затрат на подбор температурно-скоростных режимов деформирования.

Формула изобретения

1. Способ изготовления изделий из алюминиевых или магниевых сплавов с нано- и субмикрокристаллической структурой, включающий предварительное равноканальное угловое прессование сплавов и последующее деформационное формообразование из них изделий, отличающийся тем, что равноканальное угловое прессование сплавов проводят со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_{РКУП} = 0{,}4\ мм/сек$ и температурой деформации $T_{РКУП}$, выбираемой в интервале 150-275°C в зависимости от состава сплавов по следующему соотношению:

$$T_{РКУП} = -\left(\frac{Q_b^*}{kT_m}\right) \frac{T_m}{\ln\left[\frac{1}{D_{b0}^*} \frac{\dot{\varepsilon}_D^{7/2}}{\dot{\varepsilon}_{РКУП}^{5/2}} \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^{35/4}\right]},$$

где T_m - абсолютная температура плавления сплавов;

k - постоянная Больцмана;

Q_b^* - энергия активации диффузии по неравновесным границам зерен;

D_{b0}^* - предэкспоненциальный множитель коэффициента диффузии по неравновесным границам зерен;

$\dot{\varepsilon}_D$ - скорость внутризеренной деформации;

Z_1 и Z_2 - расчетные модельные параметры неравновесного состояния структуры сплавов после равноканального углового прессования, зависящие от их химического и фазового состава, при этом для алюминиевых сплавов $Z_1=3{,}0\cdot10^{-4}$ м$^{3/7}$ и $Z_2=9{,}01$ м$^{1/5}$, а для магниевых сплавов $Z_1=4{,}24\cdot10^{-4}$ м$^{3/7}$ и $Z_2=9{,}18$ м$^{1/5}$;

а деформационное формообразование проводят штамповкой сплавов при комнатной температуре со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_v$, выбираемой в интервале $0{,}3\cdot10^{-3}$-$0{,}3$ с$^{-1}$ в зависимости от состава сплавов по следующему соотношению:

$$\dot{\varepsilon}_v \le Z_3 \frac{D_b^*}{d^{5/2}},$$

где D_b^* - коэффициент диффузии по неравновесным границам зерен;

d - размер зерна сплавов после равноканального углового прессования;

Z_3 - расчетный модельный параметр состояния нано- и субмикрокристаллической структуры сплавов после штамповки, зависящий от их химического и фазового состава, при этом для алюминиевых сплавов $Z_3=6{,}97\cdot10^{-8}$ м$^{3/2}$, а для магниевых сплавов $Z_3=8{,}19\cdot10^{-8}$ м$^{3/2}$.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что для сплава АМг6 системы Al-Mg-Mn равноканальное угловое прессование проводят при общем числе циклов прессования, равном шести, со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_{РКУП} = 0{,}4$ мм/с при температуре деформации $T_{РКУП}$=200°С, а штамповку - со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_v = 10^{-2}$ с$^{-1}$ при комнатной температуре.

3. Способ по п.1, отличающийся тем, что для сплава МА14 системы Mg-Al-Zn-Mn равноканальное угловое прессование проводят при общем числе циклов прессования, равном шести, со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_{РКУП} = 0{,}4$ мм/с при температуре деформации $T_{РКУП}$=275°С, а штамповку - со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_v = 3\cdot10^{-3}$ с$^{-1}$ при комнатной температуре.

4. Способ по любому из пп.1-3, отличающийся тем, что после равноканального углового прессования сплавы отжигают при температуре, выбираемой в интервале 100-300°С в зависимости от их марки.

5. Изделие, изготовленное из алюминиевых или магниевых сплавов с нано- и субмикрокристаллической структурой, отличающееся тем, что оно изготовлено способом по любому из пп.1-3, при этом сплав имеет микроструктуру со средним размером зерна 0,4-2,0 мкм и характеризуется в зависимости от марки сплава пределом прочности 260-450 МПа и относительным удлинением 20-65%.

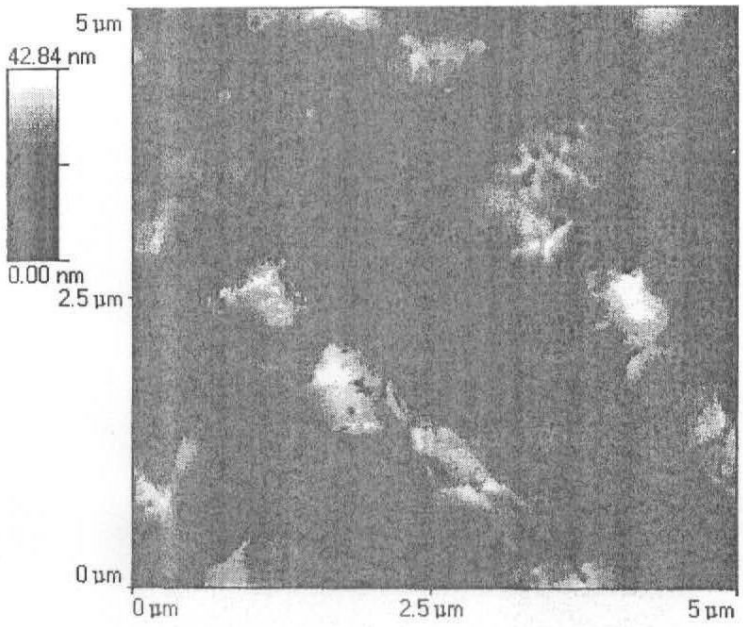
6. Изделие по п.5, отличающееся тем, что оно изготовлено из алюминиевого сплава АМг6, при этом сплав после равноканального углового прессования имеет микроструктуру со средним размером зерна 0,5 мкм и характеризуется пределом прочности 440 МПа и относительным удлинением 28%.

7. Изделие по п.5, отличающееся тем, что оно изготовлено из магниевого сплава

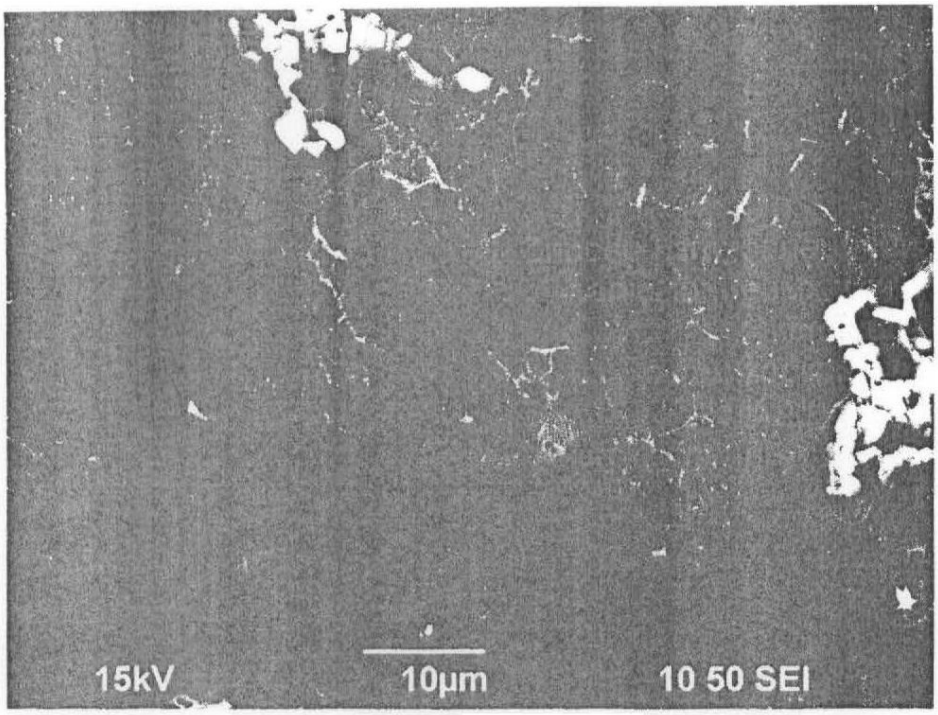
МА14, при этом сплав после равноканального углового прессования имеет микроструктуру со средним размером зерна 2,0 мкм и характеризуется пределом прочности 280 МПа и относительным удлинением 58%.

8. Изделие по п.5, отличающееся тем, что оно изготовлено из магниевого сплава МА2-1, при этом сплав после равноканального углового прессования при общем числе циклов прессования, равном шести, со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_{РКУП} = 0,4\,мм/с$ при температуре деформации $T_{РКУП}$=250°С имеет микроструктуру со средним размером зерна 1,5 мкм и характеризуется пределом прочности 325 МПа и относительным удлинением 65%.

9. Изделие, изготовленное из алюминиевых сплавов с нано- и субмикрокристаллической структурой, отличающееся тем, что оно изготовлено способом по п.2 из сплава АМг6, при этом сплав после равноканального углового прессования при общем числе циклов прессования, равном шести, со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_{РКУП} = 0,4\,мм/с$ при температуре деформации $T_{РКУП}$=200°С и отжига при температуре 300°С имеет микроструктуру со средним размером зерна 5,4 мкм и характеризуется пределом прочности 350 МПа и относительным удлинением 58%.



Фиг. 1



Фиг. 2