



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2014136192/02, 05.09.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
05.09.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 05.09.2014

(45) Опубликовано: 27.02.2016 Бюл. № 6

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: EP 1543174 B1, 15.09.2010. RU 2425902 C2, 10.08.2011. US 6395111 B1, 28.05.2002. US 20020157742 A1, 31.10.2002. CN 101956151 A, 26.01.2011.

Адрес для переписки:

107061, Москва, Преображенская пл., 6, ООО  
"Вахнина и Партнеры"

(72) Автор(ы):

Каблов Евгений Николаевич (RU),  
Ткаченко Евгения Анатольевна (RU),  
Милевская Тамара Васильевна (RU),  
Вахромов Роман Олегович (RU),  
Антипов Владислав Валерьевич (RU),  
Селиванов Андрей Аркадьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Российская Федерация, от имени которой  
выступает Министерство промышленности  
и торговли Российской Федерации  
(Минпромторг России) (RU)

**(54) СПОСОБ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

(57) Реферат:

Изобретение относится к области металлургии, в частности к технологии термической обработки изделий из высокопрочных алюминиевых сплавов для использования в судостроении и конструкциях, эксплуатирующихся в морских условиях, авиакосмической технике, транспортном машиностроении. Способ термической обработки изделия из высокопрочного алюминиевого сплава системы Al - Zn - Mg - Cu, содержащего, мас. %: цинк 6,0-9,0, магний 1,6-2,6, медь 0,8-1,6, цирконий 0,07-0,15, железо 0,02-0,15, кремний менее 0,1, алюминий и неизбежные примеси - остальное, включает закалку и искусственное старение, содержащее стадии изотермического и неизотермического старения, при этом сначала проводят первую стадию изотермического старения при температуре 60-90°C в течение 10-24 ч, затем проводят первую стадию неизотермического старения путем нагрева

изделия до температуры 160-195°C со скоростью 10-15°C/ч, после чего осуществляют вторую стадию изотермического старения при температуре 160-195°C в течение времени, определяемом из зависимости  $t = \ln(473/T)/0,009$ , где  $t$  - время выдержки, ч,  $T$  - температура выдержки, К, и вторую стадию неизотермического старения путем охлаждения с температуры 160-195°C до температуры 80°C со скоростью, определяемой по формуле  $V = \ln(T/88,5)/0,0057$ , где  $V$  - скорость охлаждения, К/ч,  $T$  - температура выдержки, К. Технический результат заключается в снижении склонности к расслаивающей, межкристаллитной и питтинговой коррозии, повышении однородности структуры и свойств в объеме изделия, получении изделий с повышенными прочностными и коррозионными характеристиками, в том числе для эксплуатации в морских условиях. 2 з.п. ф-лы, 2 табл., 1 пр.



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.  
*C22F 1/053* (2006.01)  
*C22C 21/10* (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(21)(22) Application: **2014136192/02, 05.09.2014**(24) Effective date for property rights:  
**05.09.2014**

Priority:

(22) Date of filing: **05.09.2014**(45) Date of publication: **27.02.2016** Bull. № 6

Mail address:

**107061, Moskva, Preobrazhenskaja pl., 6, OOO  
"Vakhnina i Partnery"**

(72) Inventor(s):

**Kablov Evgenij Nikolaevich (RU),  
Tkachenko Evgenija Anatol'evna (RU),  
Milevskaja Tamara Vasil'evna (RU),  
Vakhromov Roman Olegovich (RU),  
Antipov Vladislav Valer'evich (RU),  
Selivanov Andrej Arkad'evich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Rossijskaja Federatsija, ot imeni kotoroj  
vystupaet Ministerstvo promyshlennosti i  
torgovli Rossijskoj Federatsii (Minpromtorg  
Rossii) (RU)**(54) **PROCEDURE FOR THERMAL TREATMENT OF ITEMS OUT OF HIGH STRENGTH ALUMINIUM ALLOYS**

(57) Abstract:

FIELD: metallurgy.

SUBSTANCE: procedure for the thermal treatment of items out of high strength aluminium alloys of a system Al - Zn - Mg - Cu, containing in wt %: zinc 6.0-9.0, magnesium 1.6-2.6, copper 0.8-1.6, zirconium 0.07-0.15, iron 0.02-0.15, silicon below 0.1, aluminium and inevitable admixtures - the rest, includes hardening and artificial ageing, contains the stages of isothermal and non-isothermal ageing. First of all, the first stage of isothermal ageing is performed at a temperature of 60-90°C for 10-24 h, then the first stage of non-isothermal ageing is performed by means of the item heating to 160-195°C with the rate of 10-15°C/h, then the second stage of isothermal ageing at a temperature of 160-195°C is performed during the time period determined

from the relationship  $t = \ln(473/T)/0.009$ , where  $t$  is the holding time,  $h$ ,  $T$  is the holding temperature,  $K$ , and the second stage of non-isothermal ageing is performed by cooling from 160-195°C to 80°C with the rate determined by the equation  $V = \ln(T/88.5)/0.0057$ , where  $V$  is the cooling rate,  $K/h$ ,  $T$  is the holding temperature,  $K$ .

EFFECT: reduced sensitivity to laminating, intergranular and pitting corrosion, increased homogeneity of the structure and properties in the item volume, producing the items with improved strength and corrosion characteristics, including for marine conditions operation.

3 cl, 2 tbl, 1 ex

Изобретение относится к области металлургии, в частности к технологии упрочняющей термической обработки изделий из высокопрочных алюминиевых сплавов для использования главным образом в судостроении и конструкциях, эксплуатирующихся в морских условиях, а также авиакосмической технике и транспортном машиностроении.

Такие изделия должны соответствовать повышенным требованиям по прочностным свойствам и коррозионной стойкости для обеспечения высокой весовой эффективности, ресурса и надежности конструкций в эксплуатации.

Для получения требуемого комплекса прочностных и коррозионных свойств в изделиях наиболее перспективным материалом служат алюминиевые сплавы на основе системы Al - Zn - Mg - Cu. Эти сплавы позволяют гибко управлять комплексом свойств благодаря разнообразию структурно-фазового состояния, формируемого в изделиях в зависимости от содержания компонентов, их соотношения и режимов термической обработки, при этом существенное повышение коррозионной стойкости в перестаренных состояниях (T2, T3) сопровождается некоторым снижением характеристик прочности, которые все же остаются на высоком уровне.

Из анализа работ [Авиационные материалы. Справочник. /Под ред. Академика Е.Н. Каблова. - М., 2008, том 4, часть 1; или Мондольфо Л.Ф. Структура и свойств алюминиевых сплавов. - М.: Изд-во иностр. лит., 1962, 238 с.; или Фридляндер И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. - М.: Металлургия, 1979, 208 с.], описывающих влияние химического состава алюминиевых сплавов и типа тонкой структуры на механические и коррозионные свойства изделий, следует, что для обеспечения высокого уровня прочностных характеристик (предела текучести не менее 380 МПа) содержание основных легирующих компонентов (цинка и магния) должно быть в пределах 6-9%, а соотношение цинка и магния - порядка 2,7-4,2. Ввиду неоднозначного влияния меди в высокопрочных сплавах системы Al - Zn - Mg - Cu на их коррозионные характеристики (она уменьшает склонность к коррозии под напряжением (КР), но негативно влияет на характеристики общей коррозионной стойкости и питтинговой коррозии) ее содержание в случае применения сплавов в условиях морского климата следует ограничивать количеством ~1,0-1,4%.

Одним из главных факторов, влияющих на комплекс механических и коррозионных свойств высокопрочных алюминиевых сплавов, помимо химического состава служит структура, формирующаяся при различных режимах термической обработки (распределение и величина упрочняющих выделений, строение границ зерен, размеры зон свободных от выделений) [D.K. Xu, N. Birbilis, P.A. Rometsch. The effect of pre-aging temperature and retrogression heating rate on the strength and corrosion behavior of AA7150 // Corrosion Science, 2012, vol. 54, pp. 17-25 или M. Angappan, V. Sam-path, B. Ashok, V. P. Deepkumar. Retrogression and reaging treatment on short transverse tensile properties of 7010 aluminum alloy extrusions // Materials & Design, 2011, vol. 32, no. 7, pp. 4050-4053].

Повышению коррозионной стойкости способствует улучшение состояния границ зерен в связи с частичным растворением и коагуляцией упрочняющих выделений, а также увеличением расстояния между ними по мере увеличения выдержки и/или температуры при старении, отсутствие у границ зерен зон, свободных от выделений, и участков зерен с неоднородностью по выделениям упрочняющих частиц фазы MgZn<sub>2</sub>. Наиболее эффективно управление выделениями фазы MgZn<sub>2</sub> для получения комплекса высоких механических свойств и хорошей коррозионной стойкости осуществляют путем многоступенчатого старения, в том числе по режимам, обеспечивающим потерю когерентности упрочняющих частиц и матрицы.

Известен способ неизотермического старения алюминиевого сплава серии 7000 (системы Al - Zn - Mg - Cu) [заявка США US2007/0267113, опубл. 22 ноября 2007 г.], содержащего 6-10% Zn, 1,2-1,9% Mg, 1,2-2,2% Cu, 0,05-0,4% Zr, остальное алюминий и случайные элементы и примеси, включающий нагрев сплава с постоянной скоростью менее чем 14°C/ч в течение приблизительно 8-15 ч до температуры от 182 до 204°C. Этот способ существенно сокращает продолжительность технологического цикла старения, но не обеспечивает требуемый уровень прочностных характеристик изделия: после старения по указанному способу предел текучести изделия составляет 331-374 МПа.

Известен способ термической обработки изделий из дисперсионно твердеющих алюминиевых сплавов [заявка РСТ WO 01/48259, опубл. 5 июля 2001 г.], включающий многостадийную термическую обработку, обозначаемую заявителями как режим Т6I6, целью которой является получение прочностных характеристик на 5-10% выше, чем после стандартного старения по режиму Т6 (российское обозначение Т1) на максимальную прочность. Известная термическая обработка высокопрочных алюминиевых сплавов по режиму Т6I6 включает закалку с температуры обработки на твердый раствор, старение при температуре первой ступени 150°C в течение времени от нескольких минут до 8 ч (в частном воплощении для сплава Al - 6% Zn - 2% Mg - 0,5% Ag в течение 40 мин), резкое охлаждение с температуры 150°C в жидкой среде или холодной воде до температуры второй ступени 20-120°C (в частном воплощении 35°C), выдержке при этой температуре от нескольких часов до нескольких недель, нагрев до температуры третьей ступени, равной температуре первой ступени или на 20-50°C выше или ниже, чем температура первой ступени, время выдержки на третьей ступени 8-500 ч.

Недостатком этого способа является значительная продолжительность процесса термической обработки и невысокая коррозионная стойкость изделий, обусловленная выделением когерентных упрочняющих фаз вследствие проведения на всех этапах термической обработки старения при низких температурах.

Наиболее близким к предложенному способу термической обработки является способ искусственного старения изделий из алюминиевого сплава, имеющих улучшенную комбинацию свойств, описанный в патенте США US6972110, опубл. 6 декабря 2005 г.

Известный способ, принятый за прототип, включает термическую обработку изделий из высокопрочного алюминиевого деформируемого сплава системы Al - Zn - Mg - Cu, содержащего 7-9,5% Zn, 1,3-1,68% Mg, 1,3-1,9% Cu, до 0,4% Zr, до 0,4% Sc, до 0,3% Hf, до 0,06% Ti, до 0,03% Ca, до 0,002% Be, менее 0,1% Mn, менее 0,05% Cr, алюминий и случайные элементы и примеси - остальное, полученных путем приготвления, гомогенизации и горячей обработки слитков из указанного сплава с использованием прокатки, прессования иликовки. Непосредственно термическая обработка включает нагрев до температуры обработки на твердый раствор (474-477°C), закалку с этой температуры и искусственное старение, которое осуществляют с использованием последовательности этапов старения:

- первый этап проводят в диапазоне температур 93-135°C в течение 2-18 ч,
- второй этап проводят в диапазоне температур 149-168°C в течение 4-18 ч,
- третий этап проводят в диапазоне температур 93-135°C в течение 2-24 ч.

Этот способ позволяет получить на массивных изделиях в виде плит и поковок толщиной до 200 мм высокий уровень прочностных характеристик, в частности предела текучести, равного 418-466 МПа. Недостатком указанного способа является то, что при высоком значении предела текучести не обеспечивается требуемый уровень

коррозионной стойкости под напряжением и склонности к расслаивающей коррозии при ускоренных испытаниях с переменным погружением в 3,5%-ный раствор NaCl или в синтетическую морскую воду, а также при натуральных испытаниях на морском побережье или в условиях промышленной атмосферы, в частности критическое напряжение до разрушения образцов из сплава 7085 при испытаниях в условиях переменного погружения в 3,5%-ный водный раствор NaCl составило 187 МПа. При этом напряжении разрушение образцов, испытываемых на морском побережье и в условиях промышленной атмосферы, может наступить через 100 и 180 дней соответственно, а склонность к расслаивающей коррозии оценивается как «ЕВ», что соответствует в единицах российского стандарта - до 5 баллов.

Технической задачей изобретения является разработка способа термической обработки изделий из высокопрочных алюминиевых сплавов, обеспечивающего получение изделий с улучшенным комплексом механических и коррозионных свойств.

Техническим результатом изобретения является получение изделий с повышенными прочностными свойствами и коррозионной стойкостью, особенно с низкой склонностью к расслаивающей, межкристаллитной и питтинговой коррозии, с высоким сопротивлением коррозионному растрескиванию под напряжением при уровне предела текучести не ниже 390 МПа, что позволит обеспечить надежность и ресурс изделия при эксплуатации во всеклиматических условиях, в том числе в условиях морского климата

Для достижения поставленного технического результата предложен способ термической обработки изделия из высокопрочного алюминиевого сплава, включающий в себя процессы закалки и искусственного старения, при котором согласно изобретению процесс искусственного старения содержит этапы изотермического и неизотермического старения с заданными скоростями нагрева и охлаждения, причем этап изотермического старения проводят по меньшей мере в две стадии при температуре 60-90°C в течение 10-24 ч и при температуре 160-195°C в течение заданного времени выдержки, а этап неизотермического старения проводят по меньшей мере в две стадии с нагревом со скоростью 10-15°C/ч в интервале температур 60-195°C и с охлаждением с заданной скоростью в интервале температур 195- 80°C.

Предпочтительно заданное время выдержки на этапе изотермического старения в интервале температур 160-195°C определяют по формуле

$$t = \ln(473/T) / 0,009,$$

где  $t$  - время выдержки, ч,

$T$  - температура выдержки, К.

Предпочтительно, охлаждение на этапе неизотермического старения в интервале температур 195-80°C проводят со скоростью, определяемой по формуле

$$V = \ln(T/88,5) / 0,0057,$$

где  $V$  - скорость охлаждения, К/ч,

$T$  - температура выдержки, К.

Предпочтительно высокопрочный алюминиевый упрочняемый сплав содержит массовую долю элементов, %:

цинк 6,0-9,0

магний 1,6-2,6

медь 0,8-1,6

цирконий 0,07-0,15

железо 0,02-0,15

кремний менее 0,1

алюминий и неизбежные примеси - остальное.

Предпочтительно закалка включает нагрев до температуры 460-480°C и охлаждение в воде или водном растворе полимера.

Предпочтительно изделие представляет собой деформированные кованные, пресованные, катаные полуфабрикаты и детали, изготовленные из этих  
5 полуфабрикатов.

Термическая обработка по предложенному способу за счет введения этапов неизотермического старения, особенно при охлаждении, способствует увеличению однородности структуры по объему изделий благодаря дополнительному увеличению при замедленной регламентированной скорости охлаждения количества упрочняющих  
10 внутризеренных выделений на фоне сформировавшихся при достаточно высокой температуре изотермического старения более крупных некогерентных выделений на границах зерен и субзерен. Сформированная в результате интегрального эффекта искусственного старения в изделиях из высокопрочных сплавов системы Al - Zn - Mg -  
15 Cu структура обеспечивает одновременно повышение прочностных свойств и улучшение коррозионных характеристик изделия, особенно снижение склонности к межкристаллитной, питтинговой, расслаивающей коррозии и повышение коррозионной стойкости под напряжением.

#### Примеры осуществления

Для проведения экспериментов были отлиты слитки из сплава 1933 диаметром 670  
20 мм, плоские слитки сечением 300×1100 мм и полые слитки диаметром 750×260 мм, из которых изготавливали путем горячей деформации изделия: поковки, пресованные трубы и катаные плиты.

Химический состав отлитых слитков находился в пределах 6,7-7,1% Zn, 1,8-1,9% Mg, 1,0-1,1% Cu, 0,11-0,12% Zr, 0,04% Ti, 0,003% Ca, 0,09-0,10% Fe, менее 0,05% Si, алюминий,  
25 случайные элементы и примеси - остальное.

Из гомогенизированных слитков методом осадки на вертикальном прессе были получены поковки диаметром 540 мм и толщиной 200 мм, методом горячего пресования на горизонтальном прессе были изготовлены трубы диаметром 540 мм с толщиной  
30 стенки 60 мм, методом прокатки на двухклетьевом стане были изготовлены плиты толщиной 200 мм. Полуфабрикаты были подвергнуты термической обработке. Закалку изделий по предлагаемому способу термической обработки проводили с температуры нагрева 470-475°C, после выдержки от 1,5 до 3,5 ч, в зависимости от толщины охлаждение осуществляли в воде при температуре 25-30°C. В таблице 1 представлены  
35 режимы старения изделий по предлагаемому способу (1-3) и по способу прототипа (4-5).

Поковки были состарены по режиму 1 (предлагаемый способ) и по режиму 5 (способ прототипа).

Ниже приведен пример расчета температурно-скоростных параметров режима старения повок по предлагаемому способу: указанное в таблице 1 время выдержки  
40 на высокотемпературной ступени 185°C было рассчитано по формуле  $t = \ln(473/T)/0,009 = \ln(473/458)/0,009 = 0,03222/0,009 = 3,58$  ч, где t - время выдержки, ч, T - температура, К.

Скорость охлаждения с температуры выдержки на изотермической ступени 185°C рассчитана по формуле  $V_{\text{охл}} = \ln(T/88,5)/0,0057$ , где

45  $V_{\text{охл}}$  - скорость охлаждения, К/ч,

T - температура, К.

Расчетная скорость охлаждения составила:  $V_{\text{охл}} = \ln[(185+273)/88,5]/0,0057 = \ln(458/$

88,5)/0,0057=288K/ч=15°C/ч.

Аналогичным образом были рассчитаны параметры режимов старения 2 и 3 (таблица 1) для труб и плит.

Для сравнения старение поковок и плит было также проведено по режимам 4 и 5, взятым из способа-прототипа.

Из обработанных по вышеописанным режимам изделий были изготовлены образцы и проведены испытания с определением механических свойств и коррозионных характеристик, а также изготовлены детали конструкций для коррозионных испытаний в натуральных условиях.

Результаты испытаний механических и коррозионных свойств изделий, термически обработанных по предлагаемому способу в сравнении со свойствами изделий, обработанных по способу прототипа, приведены в таблице 2.

Изделия, изготовленные по предлагаемому способу, характеризуются более высоким уровнем механических свойств ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_5$ ), менее склонны к межкристаллитной (МКК) и расслаивающей коррозии (РСК), имеют более высокое сопротивление коррозионному растрескиванию (КР) при ускоренных испытаниях и показали большую долговечность без разрушения при натуральных испытаниях образцов и деталей в условиях морского климата и лучшее состояние поверхности после испытаний в промышленной атмосфере.

Таким образом, термическая обработка изделий и деталей из них по предложенному способу обеспечивает лучшее сочетание прочностных характеристик и коррозионной стойкости. Термически обработанные по предложенному способу изделия предназначены для изготовления силовых элементов (корпусов, шпангоутов, фитингов, балок и т.п.) конструкций в судостроении, авиакосмической технике и транспортном машиностроении. Применение предлагаемого способа для термической обработки изделий позволит повысить их весовую эффективность, ресурс и надежность при эксплуатации, в том числе в условиях морского климата.

Таблица 1 – Режимы термической обработки

№ п/п	Вариант термической обработки	Вид изделия	Старение									
			Изотермическое, стадия 1		Неизотермическое, стадия 1		Изотермическое, стадия 2		Неизотермическое, стадия 2		Изотермическое, стадия 3*	
			Температура нагрева Т, °С	Время выдержки τ, ч	Скорость нагрева, Vнагр., °С/ч	Температурный интервал, °С	Температура нагрева Т, °С	Время выдержки τ, ч	Скорость охлаждения Vохл., °С/ч	Температурный интервал, °С	Температура нагрева Т, °С	Время выдержки τ, ч
1	Предлагаемый способ	Поковка размером Ø540×200 мм	90	10	15	90 - 185	185	3,5	15	185 - 80	-	-
2		Прессованная труба сечением Ø410×60 мм	60	24	15	60 - 160	160	9,8	5,5	160 - 80	-	-
3		Катаная плита толщиной 150 мм	75	15	10	75 - 195	195	1,5	19	195 - 80	-	-
4	Прототип	Катаная плита толщиной 150 мм	121	6	-	-	154	15	-	-	121	24
5		Поковка толщиной 175 мм	93	18	-	-	168	10	-	-	135	12
*Только прототип												

Таблица 2 – Механические и коррозионные свойства изделий

№ п/п	Вариант термической обработки	Вид полуфабриката	Механические свойства			Коррозионные свойства					
			Временное сопротивление, $\sigma_{0,2}$ , МПа	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta_5$ , %	Ускоренные испытания			Натурные испытания на морском побережье		Натурные испытания в промышленной атмосфере Время экспозиции образцов в промышленной атмосфере <sup>2</sup> , сутки
Склонность к МКК, ГОСТ 9.021-74, мм	Склонность к РСК, ГОСТ 9.904-82, балл	Сопротивление КР, скр, ГОСТ 9.019-74 МПа				Время экспозиции образцов без разрушения <sup>1</sup> , сутки	Чувствительность к литтинговой коррозии, макс. глубина <sup>2</sup> , мм				
1	Предлагаемый способ	Поковка толщиной 200 мм	470-500	440-470	14-19	Отсутствует	2-3	245	330	0 потускнение поверхности	потускнение поверхности
2		Прессованная труба сечением $\varnothing 410 \times 200$ мм	500-530	460-490	16-20	Отсутствует	3-4	245	330	0 потускнение поверхности	потускнение поверхности
3		Катаная плита толщиной 150 мм	490-520	450-470	13-16	Отсутствует	3-4	245	330	0 потускнение поверхности	потускнение поверхности
4	Прототип	Катаная плита толщиной 150 мм	470-490	420-460	9 – 11	0,10	4-5	187	260	0,04 единичные точки, потемнение поверхности	потемнение поверхности
5		Поковка толщиной 200 мм	430-450	380-400	10-13	0,12	4-5	187	278	0,06 единичные точки, потемнение поверхности	потемнение поверхности

1-Испытания при постоянном растягивающем напряжении –  $\sigma = 220$  МПа; 2- время экспозиции 300 суток

### Формула изобретения

0,02-0,15, кремний менее 0,1, алюминий и неизбежные примеси – остальное, включающий закалку и искусственное старение, содержащее стадии изотермического и неизотермического старения, при этом сначала проводят первую стадию изотермического старения при температуре 60-90°C в течение 10-24 ч, затем проводят первую стадию неизотермического старения путем нагрева изделия до температуры 160-195°C со скоростью 10-15°C/ч, после чего осуществляют вторую стадию изотермического старения при температуре 160-195°C в течение времени, определяемом из зависимости  $t = \ln(473/T)/0,009$ , где: t - время выдержки, ч, T - температура выдержки, в градусах К, и вторую стадию неизотермического старения путем охлаждения с температуры 160-195°C до температуры 80°C со скоростью, определяемой по формуле  $V = \ln(T/88,5)/0,0057$ , где: V - скорость охлаждения, в К/ч, T - температура выдержки, в градусах К.

2. Способ по п. 1, в котором закалка включает нагрев до температуры 460-480°C и охлаждение в воде или водном растворе полимера.

3. Способ по п. 1, в котором изделие представляет собой деформированные кованы, прессованные, катаные полуфабрикаты и детали, изготовленные из этих полуфабрикатов.