

УДК 669.715

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

© 2012 О. Г. Савельева

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Установлена связь между структурными показателями и механическими свойствами алюминиевых сплавов АМг10 и Д16. Определены факторы, которые зависят от изменения структуры и с которыми напрямую связаны механические и технологические свойства материалов. Проанализировано влияние режимов пластической деформации, рекристаллизационного отжига, а также старения на формирование остаточных напряжений I, II и III рода.

*Механические свойства, остаточные напряжения, структурные показатели, рекристаллизационный отжиг, старение, пластическая деформация.*

### Введение

Получение особых свойств материалов, используемых в высокотехнологичных конструкциях, приводит к необходимости создания специальных материалов.

Обеспечение требуемых качественных показателей изделий является актуальной задачей. Остаточные напряжения в поверхностных слоях материала относятся к числу факторов, существенно влияющих на многие характеристики качества изделий. Качественное и количественное влияние таких напряжений на целый ряд функциональных свойств изделий требует дальнейшего изучения.

Опыт эксплуатации изделий и многочисленные эксперименты показывают, что остаточные напряжения влияют на износостойкость, коррозионную стойкость, усталостную прочность и долговечность изделий. Особенно велико их влияние на геометрическую точность изделий.

Целью данной работы является установление зависимостей между режимами обработки, механическими и технологическими характеристиками, структурными параметрами и уровнем остаточных напряжений, сформированных в процессе

изготовления деталей. Знание зависимостей необходимо для повышения точности изготовленных изделий, стабильности их свойств, формы и размеров в процессе хранения и эксплуатации готовых изделий.

Необходимо решить следующие задачи:

1. Определить влияние состояния поставки материала на уровень и распределение остаточных напряжений.
2. Разработать математическую модель расчёта остаточных напряжений с учётом реальной структуры.

В зависимости от объёма, в котором остаточные напряжения уравниваются, классифицируют следующие виды напряжений: макронапряжения (напряжения I рода) – упругие искажения, уравнивающиеся в объёме всего изделия или в его значительной части; микронапряжения (напряжения II рода) – напряжения, которые уравниваются в объёме отдельных кристаллитов или частей кристаллитов (мозаичных блоков); статические искажения решётки (напряжения III рода) – напряжения, которые уравниваются в пределах небольших групп атомов [1].

### Методика проведения исследований

Для нахождения взаимосвязи структуры, режимов термической обработки и пластической деформации были исследованы механические характеристики, изменение структуры в зависимости от термической обработки и пластической деформации с учётом остаточных напряжений I, II и III рода. На основании обработки полученных экспериментальных данных были предложены математические зависимости изменения остаточных напряжений от термического воздействия и пластической деформации.

Исследования проводили на высокопрочных алюминиевых сплавах АМг10 и Д16, химический состав которых представлен в табл. 1 и 2.

Для определения влияния состояния поставки на механические свойства сплавов АМг10 и Д16 проводились статические испытания на растяжение по ГОСТ 1497–84 [4] отожжённых (при температуре отжига  $T_{от}=430^{\circ}\text{C}$  для сплава АМг10,  $T_{от}=500^{\circ}\text{C}$  для сплава Д16) и закалённых с

последующим искусственным старением образцах (при температуре закалки  $T_3=430^{\circ}\text{C}$  для сплава АМг10,  $T_3=500^{\circ}\text{C}$  для сплава Д16).

Для установления зависимости внутренних напряжений от степени пластической деформации образцы подвергали растяжению при различных степенях пластической деформации  $\varepsilon_i$  (табл. 3).

Таблица 1. Химический состав сплава АМг10, % по массе [2]

Mg	Zr	Be	Ti	B	Cu	Co	Al
10,50	0,11	0,08	0,018	0,01	0,001	0,015	89,266

Таблица 2. Химический состав сплава Д16, % по массе [3]

Fe	Si	Mn	Ni	Ti	Al	Cu	Mg	Zn
0,5	0,5	0,66	0,04	0,15	92,36	4,26	1,28	0,25

Таблица 3. Степень деформации образцов из сплавов Д16 и АМг10

Сплав	Отожжённые образцы					Закалённые и состаренные образцы				
	$\varepsilon_1, \%$	$\varepsilon_2, \%$	$\varepsilon_3, \%$	$\varepsilon_4, \%$	$\varepsilon_5, \%$	$\varepsilon_1, \%$	$\varepsilon_2, \%$	$\varepsilon_3, \%$	$\varepsilon_4, \%$	$\varepsilon_5, \%$
АМг10	8,0	12,1	16,1	18,2	28,9	8,0	12,1	16,1	18,3	21,0
Д16	11,6	12,5	15,6	16,4	25,9	11,7	14,5	17,2	18,4	22,4

Для проведения металлографического анализа из каждого образца после отжига и закалки с последующим старением с различными степенями деформации изготовлены два микрошлифа (один - из участка очага деформации, второй - из участка отсутствия деформации) для каждого исследуемого материала. По фотографиям со структурой образцов в различном состоянии поставки осуществлялся замер длины ( $L$ ) и вычислялась деформация зёрен по длине образца по формуле

(1) каждого микрошлифа для выявления характера влияния режимов термической обработки и пластической деформации на формирование структуры и механические свойства:

$$e_d = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $\Delta l = l_k - l_0$  - изменение размера зерна после деформации, мкм;

$l_k$  - размер зерна образца после деформации, мкм;

$l_0$  - размер зерна исходного образца, мкм.

Для определения остаточных напряжений в сплавах проводился рентгеноструктурный анализ. Дифрактограммы снимались с отожженных, закалённых с последующим старением образцов с различными степенями деформаций из сплавов АМг10 и Д16. По уширению линий дифрактограммы (111) или (200) определялся размер областей когерентного рассеяния (ОКР). Микронапряжения рассчитывались по уширению линий (220) и (331) [1].

На основании полученных экспериментальных данных были выявлены зависимости изменения остаточных напряжений от термического воздействия и пластической деформации.

### **Разработка математической модели влияния пластической деформации и термической обработки на формирование требуемой структуры**

Показателями, характеризующими пластическую деформацию, являются её степень, температура и скорость. В работе рассматривается пластическое деформирование на примере листовой штамповки, при которой скорость деформации и температуру можно принять постоянной. Поэтому при установлении зависимости остаточных напряжений влияющим фактором является степень пластической деформации. При этом значительные изменения будут претерпевать напряжения I и II рода. Изменения напряжений III рода незначительны и поэтому ими пренебрегаем.

В определённом приближении можно сказать, что изменение остаточных напряжений пропорционально истинному сопротивлению деформированию сплава, которое в свою очередь связано с истинной степенью деформации. Наиболее точно это описывает кривая упрочнения металла. Остаточные напряжения, формирующиеся в процессе пластической деформации, находим из выражения:

$$ds_{I\text{ ПД}} + ds_{II\text{ ПД}} = ds_i, \quad (2)$$

где  $s_i = f(e_i)$  - уравнение кривой упрочнения.

Дифференцируя выражение (2), получаем уравнение для  $d\sigma_i$ :

$$ds_i = f'(e_i)de_i. \quad (3)$$

Подставляя выражение (3) в (2), получаем уравнение для расчёта остаточных напряжений от действия пластической деформации:

$$ds_{I\text{ ПД}} + ds_{II\text{ ПД}} = f'(e_i)de. \quad (4)$$

Интегрируя (4), получим уравнение для расчёта остаточных напряжений после пластической деформации:

$$s_{I\text{ ПД}} + s_{II\text{ ПД}} = F_1(e_i) + C_1, \quad (5)$$

где  $F_1(\varepsilon_i)$  – первообразная функциональной зависимости изменения напряжений от изменения степени пластической деформации.

При условии  $\varepsilon_i=0, \sigma_{I\text{ ПД}} + \sigma_{II\text{ ПД}}=0$  получаем  $C_1=0$ :

$$s_{I\text{ ПД}} + s_{II\text{ ПД}} = F_1(e_i). \quad (6)$$

Рекристаллизационный отжиг и старение влияют на формирование окончательной структуры полуфабрикатов и заготовок из алюминиевых сплавов. Также на изменение структуры и свойств влияет полигонизация, но её влияние на формирование остаточных напряжений подавляется последующей рекристаллизацией. Поэтому этот вид термической обработки в работе не рассматривается.

Формирование структуры при рекристаллизации и старении зависит от скорости нагрева и охлаждения, температуры и продолжительности выдержки, степени предшествующей деформации.

Уровень остаточных напряжений в процессе рекристаллизации определяется размером зерна и, следовательно, зависит

от степени предшествующей деформации, времени выдержки и температуры рекристаллизации. Остаточные напряжения связаны с пределом текучести, который зависит от диаметра субзерен по соотношению Холла – Петча [5]:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k \cdot d_{cp}^{-\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

где  $\sigma_0$  – напряжение Пайерлса, МПа;

$k$  – коэффициент Петча;

$d_{cp}$  – средний размер субзерна, Å.

Напряжение Пайерлса рассчитывается по формуле:

$$s_0 = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot G,$$

где  $G$  – модуль сдвига, МПа.

Коэффициент Петча рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{1,6 \cdot G \sqrt{b\Theta}}{2\pi \cdot (1-\nu)},$$

где  $b$  – модуль вектора Бюргерса, Å;

$\Theta$  – угол разориентировки соседних субзерен, рад;

$\nu$  – коэффициент Пуассона.

Размер зерна влияет преимущественно на изменение остаточных напряжений I и II рода. Величиной напряжений III рода можно пренебречь, так как рекристаллизационный отжиг приводит к зарождению и росту новых зёрен с меньшим количеством дефектов строения:

$$ds_{I\text{ ПЕК}} + ds_{II\text{ ПЕК}} = ds_T. \quad (8)$$

Так как для большинства сплавов оптимальная температура, скорость нагрева и охлаждения определены на практике и при назначении режима рекристаллизационного отжига остаются постоянными, то можно считать, что размер зерна при рекристаллизации является функцией от степени деформации и температуры рекристаллизации. В общем случае характер зависимости величины рекристаллизованного зерна от степени предшествующей деформации и температуры на-

грева описывается диаграммой рекристаллизации. Поскольку порог рекристаллизации и, следовательно, температура рекристаллизационного отжига являются многофакторным критерием (зависит от природы сплава, химического состава, чистоты металла, формы заготовки и т.п.), то практически для каждого из выбранных сплавов  $T_p$  является определённой величиной. В связи с этим рассматривается изменение величины рекристаллизованного зерна только в зависимости от степени предшествующей холодной деформации:

$$d_{cp} = f(e_i), \quad (9)$$

где  $d_{cp}$  – средний диаметр субзерна, Å;  $e_i$  – степень предшествующей деформации.

Подставляя (9) в (7), получим выражение для определения предела текучести в зависимости от размера зерна:

$$s_T = s_0 + k \cdot f(e_i)^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

Дифференцируя выражение (10), находим:

$$ds_T = -\frac{1}{2} \cdot k \cdot f(e_i)^{-\frac{3}{2}} \cdot f'(e_i) \cdot de_i. \quad (11)$$

Подставляя выражение (11) в (8), получим уравнение для расчёта изменения остаточных напряжений после проведения рекристаллизационного отжига:

$$ds_{I\text{ ПЕК}} + ds_{II\text{ ПЕК}} = -\frac{1}{2} \cdot k \cdot f(e_i)^{-\frac{3}{2}} \cdot f'(e_i) \cdot de_i. \quad (12)$$

Интегрируя выражение (12), получим уравнение для расчёта остаточных напряжений после рекристаллизационного отжига:

$$s_{I\text{ ПЕК}} + s_{II\text{ ПЕК}} = k \cdot F_2(e_i)^{\frac{1}{2}} + C_2, \quad (13)$$

где  $F_2(\varepsilon_i)$  – первообразная функциональной зависимости размера зерна после рек-

ристаллизации от степени предшествующей деформации.

При условии  $\varepsilon=0$ ,  $\sigma_{I ПД} + \sigma_{II ПД}=0$  получаем:

$$C_2 = -k \cdot F_0^{\frac{1}{2}},$$

$$S_{I ПЕК} + S_{II ПЕК} = k \cdot F_2(e_i)^{\frac{1}{2}} - k \cdot F_0^{\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

Основными факторами, от которых зависят свойства и характер структурных изменений конкретных сплавов при старении, являются температура нагрева под закалку, скорость охлаждения, температура повторных нагревов и время выдержки  $\tau$ . Структурные изменения, протекающие при старении, влияют на формирование напряжений II и III рода, т.к. протекают в пределах зёрен (субзёрен) и связаны с изменением искажённости кристаллической решётки. Для определения остаточных напряжений, формирующихся в процессе старения, получено выражение:

$$dS_{IICT} + dS_{IIICT} = dS_i, \quad (15)$$

где  $S_i = f(T, t)$ .

Наиболее полно характер зависимости прочностных свойств от температуры и времени выдержки описывают кривые изменения прочности в зависимости от продолжительности старения при различных температурах (рис. 1).

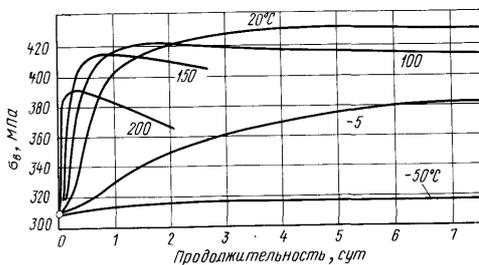


Рис. 1. Кривые изменения прочности сплава Д16 в зависимости от температуры старения [6]

Дифференцируя выражения для  $\sigma_i$  во времени выдержки и температуре старения, получаем выражение:

$$dS_{IICT} + dS_{IIICT} = \frac{\partial S_i}{\partial t} dt + \frac{\partial S_i}{\partial T} dT. \quad (16)$$

Так как для каждого сплава в конкретном случае оптимальная температура старения выбирается исходя из требований заказчика по механическим свойствам, то для установления функциональной зависимости  $\sigma_i$  от температуры рассматриваем старение при температуре  $T_0 = \text{const}$ .

При  $T_0 = \text{const}$  получаем:

$$d\sigma_{IICT} + d\sigma_{IIICT} = \frac{\partial \sigma_i}{\partial \tau} d\tau, \quad (17)$$

где  $\sigma_i = f(T_0, \tau)$ .

Дифференцируя выражение для  $\sigma_i$ , получаем:

$$dS_{IICT} + dS_{IIICT} = f'(T_0, t) dt. \quad (18)$$

Интегрируя (18), получаем уравнение для расчёта остаточных напряжений:

$$\sigma_{IICT} + \sigma_{IIICT} = F_3(T_0, \tau) + C_3,$$

где  $F_3(T_0, \tau)$  — первообразная функциональной зависимости изменения напряжений от изменения времени выдержки старения при постоянной температуре.

При условии  $\tau = 0$  и  $\sigma_{IICT} + \sigma_{IIICT} = 0$  получаем  $C_3 = 0$ :

$$S_{IICT} + S_{IIICT} = F_3(T_0, t). \quad (19)$$

При  $\tau_0 = \text{const}$  получаем

$$dS_{IICT} + dS_{IIICT} = \frac{\partial S_i}{\partial T} dT, \quad (20)$$

где  $\sigma_i = f(T, \tau_0)$ .

Дифференцируя выражение для  $\sigma_i$ , получаем:

$$dS_{IICT} + dS_{IIICT} = f'(T, t_0) dT. \quad (21)$$

Интегрируя (21), получаем уравнение для расчёта остаточных напряжений:

$$S_{IICT} + S_{IIICT} = F_4(T, t_0) + C_4, \quad (22)$$

где  $F_4(T_0, \tau)$  – первообразная функциональной зависимости изменения напряжений от изменения температуры старения при постоянном времени выдержки.

При условии  $T=0^0C$  и  $\sigma_{IICT} + \sigma_{IIICT} = 0$  получаем  $C_4 = 0$ :

$$S_{IICT} + S_{IIICT} = F_4(T, t_0). \quad (23)$$

Из выражений (19) и (23) получаем уравнение для расчёта остаточных напряжений после старения:

$$S_{IICT} + S_{IIICT} = F_3(T_0, t) + F_4(T, t_0). \quad (24)$$

Поскольку результирующие напряжения для алюминиевого сплава будут складываться последовательно из всех остаточных напряжений, возникающих за счёт каждой операции, то конечный их уровень будет определяться векторной суммой остаточных напряжений, сформированных при проведении пластической деформации, рекристаллизации и старении:

$$\begin{cases} \sigma_I = \sigma_{IПД} + \sigma_{IРЕК} + \sigma_{ICT}, \\ \sigma_{II} = \sigma_{IIПД} + \sigma_{IIРЕК} + \sigma_{IICT}, \\ \sigma_{III} = \sigma_{IIIПД} + \sigma_{IIIРЕК} + \sigma_{IIICT}. \end{cases} \quad (25)$$

Расчёт остаточных напряжений по полученным зависимостям (25) не вполне

корректен, так как разделение напряжений по роду в процессе каждой операции является условным.

В качестве результирующих остаточных напряжений необходимо рассматривать совокупность остаточных напряжений, возникающих под воздействием отдельных факторов. В статье в качестве таких факторов рассматривается пластическая деформация, рекристаллизация и старение. Объединив уравнения (6), (14), (24), находим остаточные напряжения, сформировавшиеся в детали в процессе её изготовления:

$$\begin{cases} \sigma_{IПД} + \sigma_{IIПД} = F_1(\epsilon_i), \\ \sigma_{IРЕК} + \sigma_{IIРЕК} = k \cdot F_2(\epsilon_i)^{\frac{1}{2}} - k \cdot F_0^{\frac{1}{2}}, \\ \sigma_{IICT} + \sigma_{IIICT} = F_3(T_0, \tau) + F_4(T, \tau_0). \end{cases} \quad (26)$$

Для проверки сходимости математической модели были подобраны функциональные зависимости для сплавов АМг10 и Д16 и проведены их сравнения с экспериментальными и расчётными значениями.

Для определения функциональных зависимостей напряжений от степени пластической деформации рассмотрим диаграмму упрочнения, полученную по результатам статических испытаний на растяжение (рис. 2 и 3) по методике [4].

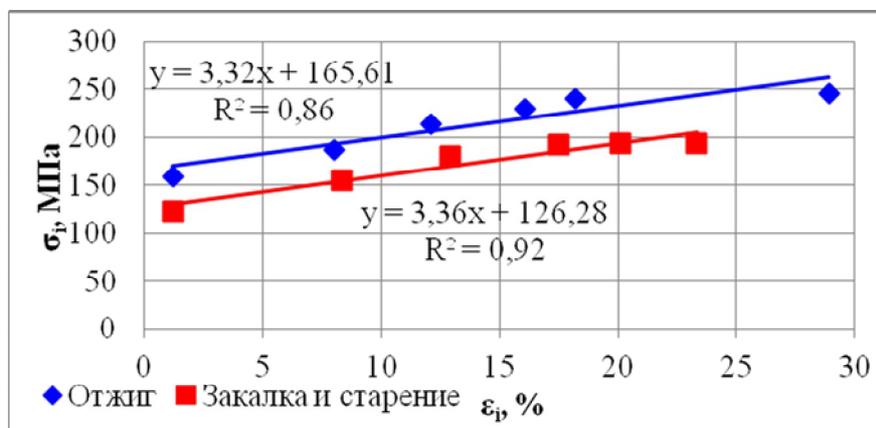


Рис. 2. Кривая упрочнения сплава АМг10

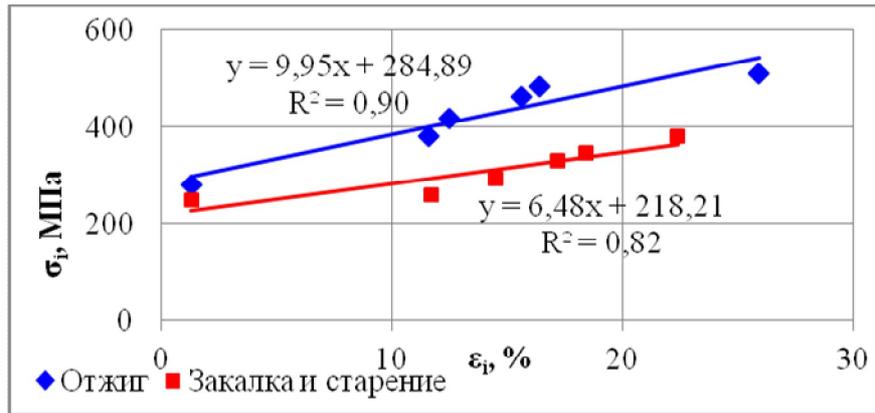


Рис. 3. Кривая упрочнения сплава Д16

Для экспериментальных значений  $\sigma_i(\varepsilon_i)$  были подобраны аппроксимирующие зависимости, которые имеют линейный характер для исследуемого диапазона  $\sigma_i$  и  $\varepsilon_i$  с максимальной величиной достоверности аппроксимации  $R^2$ .

Из рис. 2 и 3 видно, что кривая упрочнения для сплавов АМг10 и Д16 описывается линейным уравнением

$$\sigma_i = a_1 \cdot \varepsilon_i + b_1. \quad (27)$$

Дифференцируя (27), получим

$$d\sigma_i = a_1 \cdot d\varepsilon_i. \quad (28)$$

Интегрируя выражение (28), находим первообразную функциональной за-

висимости напряжений от степени деформации:

$$F_1 = a_1 \cdot e_i. \quad (29)$$

Подставляя выражение (29) в уравнение (6), получим уравнение для расчёта остаточных напряжений после пластической деформации для сплавов АМг10 и Д16:

$$s_{I\text{плд}} + s_{II\text{плд}} = a_1 \cdot e_i. \quad (30)$$

Для получения функциональной зависимости напряжений после проведения рекристаллизации рассмотрено изменение рекристаллизованного зерна от степени предшествующей деформации (рис. 4, 5).

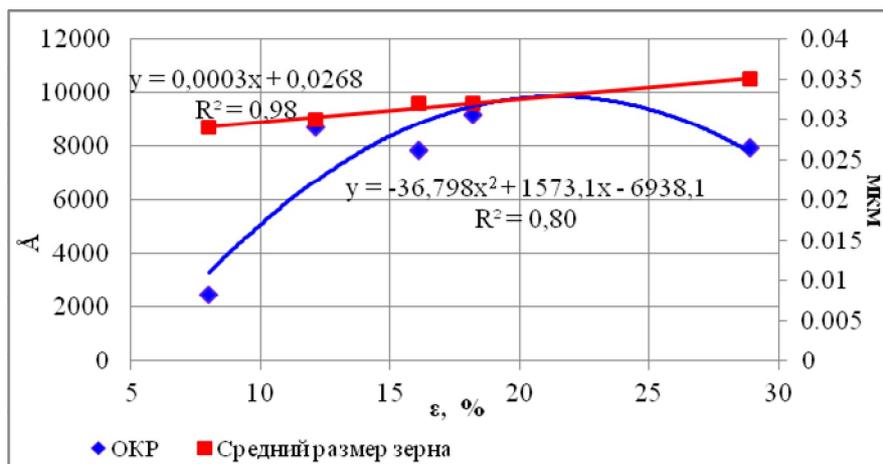


Рис. 4. Изменение размеров кристаллитов для сплава АМг10 в отожжённом состоянии

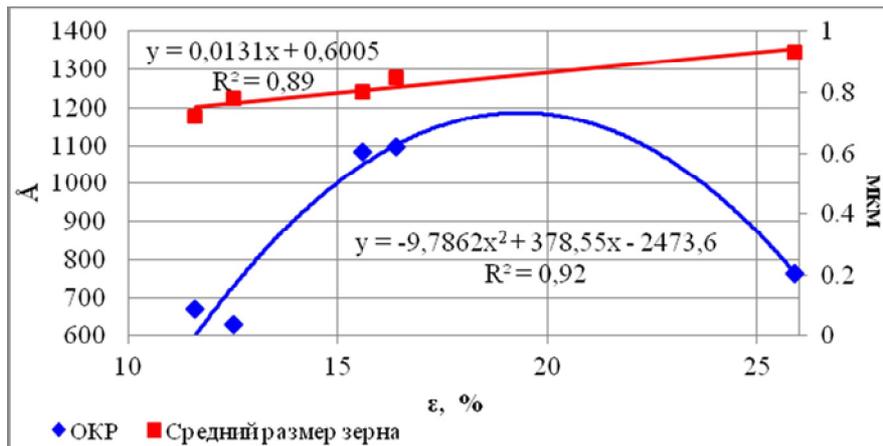


Рис. 5. Изменение размеров кристаллитов для сплава Д16 в отожжённом состоянии

Анализ полученных данных показал, что зависимость размера зерна от степени деформации можно описать квадратичной функцией:

$$d_{cp} = f(\epsilon_i) = a_2 \cdot \epsilon_i^2 + b_2 \cdot \epsilon_i + c_2, \quad (31)$$

где  $d_{cp}$  - средний диаметр субзерна,  $A$ ;  $\epsilon_i$  - степень предшествующей деформации.

Дифференцируя выражение (31), находим  $dd_{cp}$ :

$$dd_{cp} = (2a_2 \cdot \epsilon + b_2) \cdot d\epsilon. \quad (32)$$

Интегрируя выражение (32), находим первообразную функциональной зависимости размера зерна после рекристаллизации в зависимости от степени предшествующей деформации:

$$F_2(\epsilon_i) = a_2 \cdot \epsilon_i^2 + b_2 \cdot \epsilon_i. \quad (33)$$

При условии  $\epsilon_i=0$  получаем  $F_0=0$ .

Подставляя (33) в (14), находим уравнение для расчёта остаточных напряжений после проведения рекристаллизационного отжига:

$$\sigma_{I\text{PEK}} + \sigma_{II\text{PEK}} = k \cdot (a_2 \cdot \epsilon_i^2 + b_2 \cdot \epsilon_i)^{\frac{1}{2}}. \quad (34)$$

Для установления зависимостей изменения  $\sigma_i$  от температуры и времени выдержки при старении необходимо построить графики  $S_i = f(T_0, t)$  и  $s_i = f(T, t_0)$ .

В качестве примера в данной работе для сплава АМг10 рассмотрено старение при температуре  $T_0=170^{\circ}\text{C}$  (рис. 6), а для сплава Д16 – при  $T_0=200^{\circ}\text{C}$  (рис. 7).

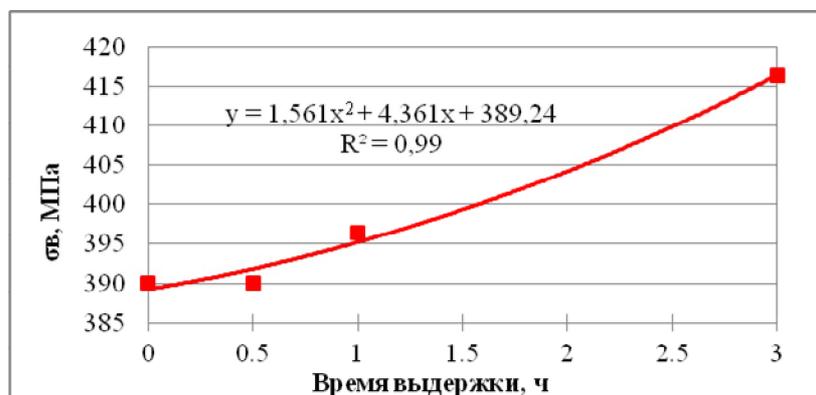


Рис. 6. Изменение прочности сплава АМг10 при  $T=170^{\circ}\text{C}$



Рис.7. Изменение прочности в сплаве Д16 при  $T=200^{\circ}C$

Эти кривые могут быть описаны при помощи квадратичной функции

$$\sigma_i = a_3 \cdot \tau^2 + b_3 \cdot \tau + c_3. \quad (35)$$

Дифференцируя выражение (35), находим выражение для  $d\sigma_i(T_0, \tau)$ :

$$d\sigma_i(T_0, \tau) = (2a_3 \cdot \tau + b_3) \cdot d\tau. \quad (36)$$

Интегрируя выражение (36), находим уравнение для первообразной функциональной зависимости изменения на-

пряжений от изменения времени выдержки при постоянной температуре:

$$F_3(T_0, \tau) = a_3 \cdot \tau^2 + b_3 \cdot \tau. \quad (37)$$

Время выдержки при старении зависит от фазового состава сплава, поэтому в данной работе для листовых заготовок из сплавов АМг10 и Д16 рассматриваем изменение  $\sigma_i$  от температуры старения при времени выдержки  $\tau_0=3$  ч для сплава АМг10 и  $\tau_0=3,5$  ч для сплава Д16 (рис. 8 и 9).

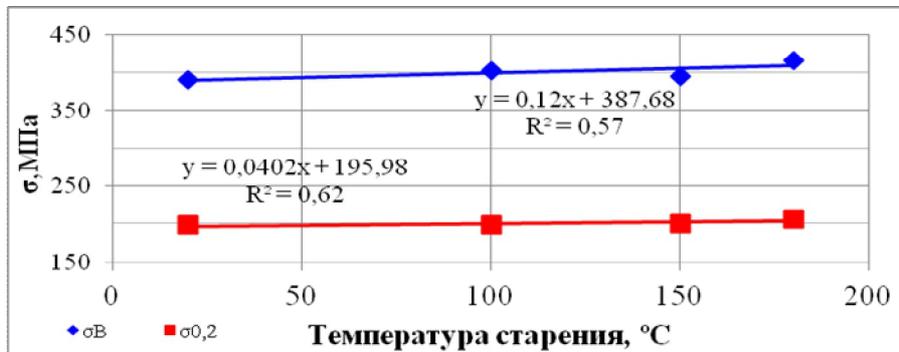


Рис. 8. Изменение прочностных характеристик сплава АМг10 в зависимости от температуры старения

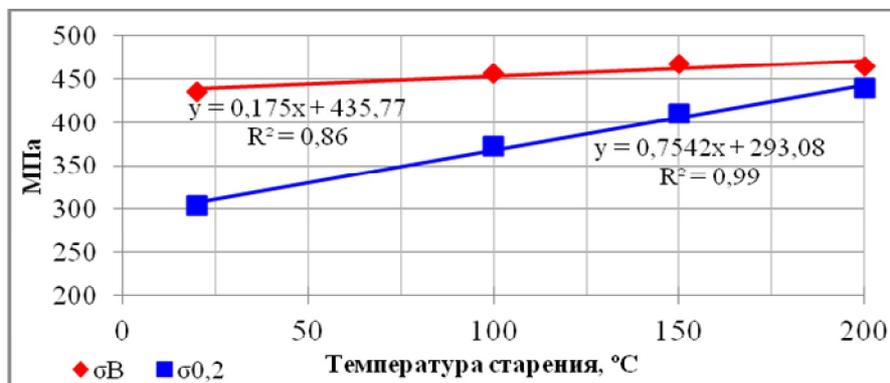


Рис. 9. Изменение прочностных характеристик сплава Д16 в зависимости от температуры старения

Полученные зависимости описываются линейными уравнениями:

$$\sigma_i = a_4 \cdot T + b_4. \quad (38)$$

Дифференцируя полученное выражение (38), находим выражение для  $d\sigma_i(T, \tau_0)$ :

$$d\sigma_i(T, t_0) = a_4 \cdot dT. \quad (39)$$

Интегрируя выражение (39), находим уравнение для определения первообразной функциональной зависимости изменения напряжений от изменения температуры старения при постоянном времени выдержки:

$$F_4(T, t_0) = a_4 \cdot T. \quad (40)$$

Подставляя выражения (37) и (40) в уравнение (24), получаем уравнение для расчёта остаточных напряжений после старения:

$$\sigma_{IICT} + \sigma_{IIICT} = a_3 \cdot \tau^2 + b_3 \cdot \tau + a_4 \cdot T. \quad (41)$$

Подставляя полученные уравнения (30), (34) и (41) в систему уравнений (26), находим уравнения для расчёта остаточных напряжений, сформировавшихся в детали при её изготовлении для сплавов АМг10 и Д16:

$$\begin{cases} \sigma_{IПД} + \sigma_{IIПД} = a_1 \cdot \varepsilon_i, \\ \sigma_{IРЕК} + \sigma_{IIРЕК} = k \cdot (a_2 \cdot \varepsilon_i^2 + b_2 \cdot \varepsilon_i)^{\frac{1}{2}}, \\ \sigma_{IICT} + \sigma_{IIICT} = a_3 \cdot \tau^2 + b_3 \cdot \tau + a_4 \cdot T. \end{cases} \quad (42)$$

Анализ полученных зависимостей показал, что увеличение степени пластической деформации приводит к росту остаточных напряжений. При рекристаллизационном отжиге увеличение степени

предшествующей деформации приводит к снижению уровня остаточных напряжений, что объясняется динамической рекристаллизацией. Проведение закалки с последующим старением способствует увеличению уровня остаточных напряжений в металле.

Расчётные остаточные напряжения после пластической деформации для сплава АМг10 и Д16 находим соответственно по уравнениям:

для сплава АМг10

$$\sigma_{IПД} + \sigma_{IIПД} = 3,32 \cdot \varepsilon_i, \quad (43)$$

для сплава Д16

$$\sigma_{IПД} + \sigma_{IIПД} = 6,48 \cdot \varepsilon_i. \quad (44)$$

Расчётные и экспериментальные значения остаточных напряжений после пластической деформации приведены на рис. 10 и 11.

Остаточные напряжения после проведения рекристаллизации находим по уравнениям:

для сплава АМг10

$$\begin{aligned} \sigma_{IРЕК} + \sigma_{IIРЕК} &= \\ &= 3,142 \cdot 10^3 (-36,798 \cdot \varepsilon_i^2 + 1573,1 \cdot \varepsilon_i)^{\frac{1}{2}}, \end{aligned} \quad (45)$$

для сплава Д16:

$$\begin{aligned} \sigma_{IРЕК} + \sigma_{IIРЕК} &= \\ &= 3,147 \cdot 10^3 (-9,7862 \cdot \varepsilon_i^2 + 378,55 \cdot \varepsilon_i)^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (46)$$

Расчётные и экспериментальные значения остаточных напряжений после рекристаллизации приведены на рис. 12 и 13.

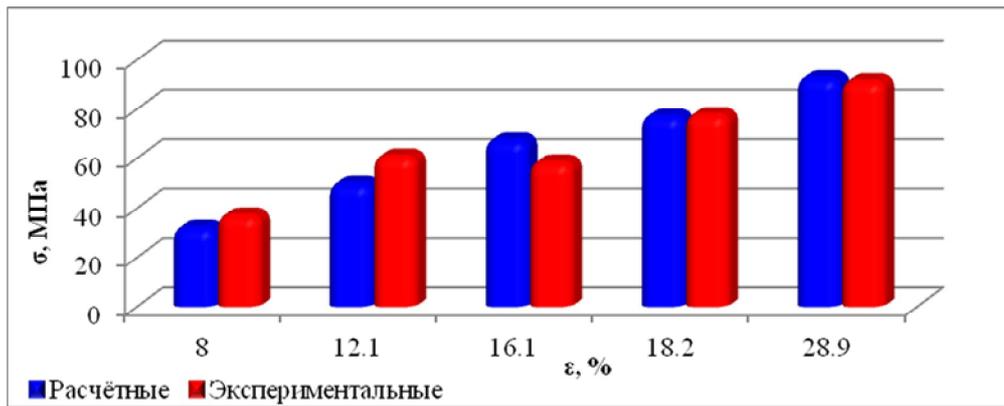


Рис. 10. Изменение остаточных напряжений от действия пластической деформации в сплаве АМг10

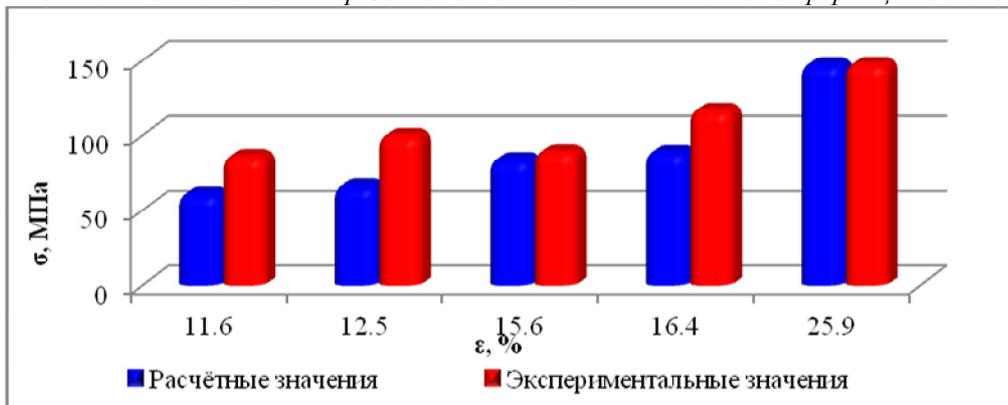


Рис. 11. Изменение остаточных напряжений от действия пластической деформации в сплаве Д16

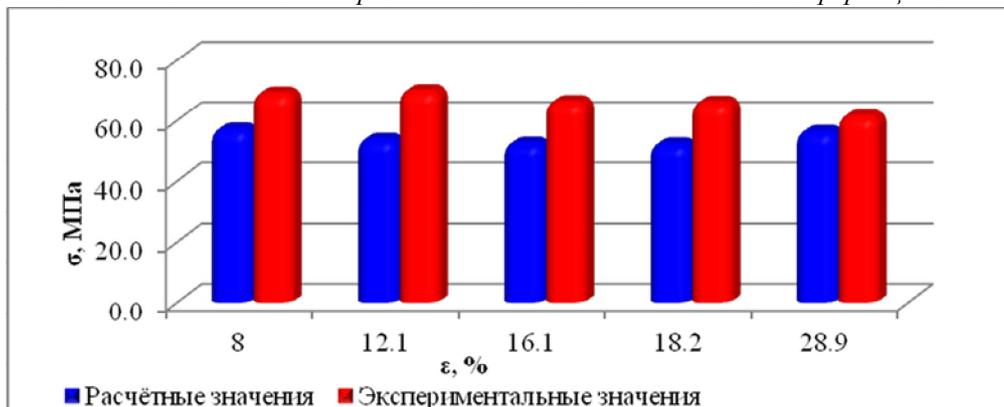


Рис. 12. Изменение остаточных напряжений после рекристаллизационного отжига для сплава АМг10

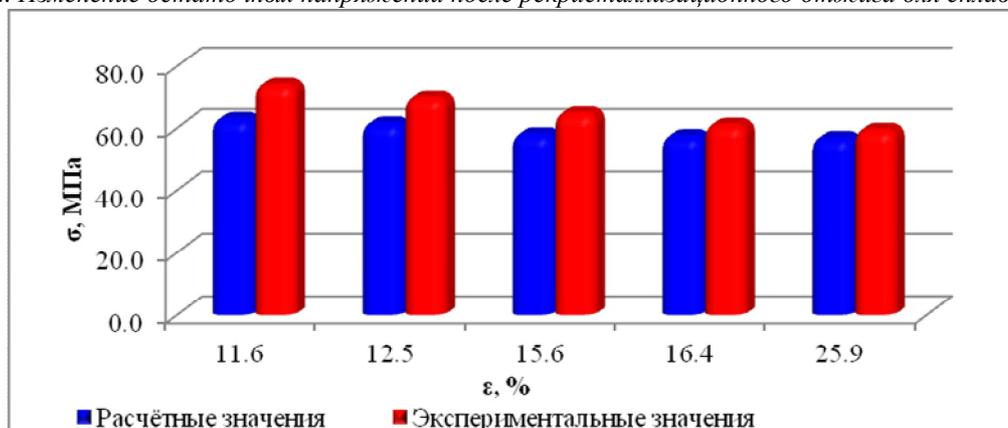


Рис. 13. Изменение остаточных напряжений после рекристаллизационного отжига в сплаве Д16

Остаточные напряжения после проведения старения находим по выражениям:

для сплава АМг10

$$\sigma_{\text{ИСТ}} + \sigma_{\text{ШСТ}} = 1,561 \cdot \tau^2 + 4,361 \cdot \tau + 0,120 \cdot T, \quad (47)$$

для сплава Д16

$$\sigma_{\text{ИСТ}} + \sigma_{\text{ШСТ}} = -36,112 \cdot \tau^2 + 170,11 \cdot \tau + 0,193 \cdot T. \quad (48)$$

Расчётные и экспериментальные данные определены для максимальной степени деформации и представлены в табл. 4.

Таблица 4. Значения расчётных и экспериментальных остаточных напряжений после закалки и старения

Сплав	Температура старения, время выдержки	Расчётные значения, $\sigma_{\text{ИСТ}} + \sigma_{\text{ШСТ}}$ , МПа	Экспериментальные значения, $\sigma_{\text{ИСТ}} + \sigma_{\text{ШСТ}}$ , МПа
АМг10	$T=170^{\circ}\text{C}$ , $\tau=3,0$ ч	84,805	80,020
Д16	$T=200^{\circ}\text{C}$ , $\tau=3,5$ ч	82,79	108,52

Проверка сходимости математической модели показала, что расхождение расчётных данных с экспериментальными данными составляет не более 26% в зависимости от сплава и режимов термической обработки и пластического деформирования. Такое расхождение можно объяснить неточностью аппроксимации полученных функциональных зависимостей, а также имеющейся погрешностью измерений при проведении экспериментов.

### Библиографический список

1. Горелик, С. С. Рентгенографический и электрооптический анализ [Текст]: практическое руководство / С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. - М.: Металлургия, 1970. - 366 с.
2. Пат. №96113996 Российская Федерация, МПК В22D11/04. Способ литья алюминиевых сплавов, алюминиевый сплав и способ производства из него про-

межуточных изделий [Текст] / В. М. Живодёров, А. М. Бибииков, А. Л. Илоземцев; заявитель и патентообладатель Живодёров Виктор Макарьевич. - №96113996/02; заявл. 24.07.1996; опубл. 27.05.1998.

3. ГОСТ 4784-74. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки [Текст] / Введ. 1974. - М.: Изд-во стандартов, 1974. - 32 с.

4. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение [Текст] / Введ. 1984-01-01. - М.: Изд-во стандартов, 1984. - 25 с.

5. Дубарев, Е. Ф. Микроскопическая деформация и предел текучести поликристаллов [Текст] / Е. Ф. Дубарев. - Томск: Изд-во Томского ун-та, 1988. - 256 с.

6. Колачев, Б. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов [Текст] / Б. А. Колачев, В. И. Елагин, В. А. Ливанов. - М.: МИСиС, 1999. - 416 с.

## THE INFLUENCE OF THE HEAT PROCESSING AND PLASTIC DEFORMATION MODES ON THE FORMATION OF THE ALUMINUM ALLOYS STRUCTURE

© 2012 O. G. Savelyeva

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

A link between structural indicators and mechanical properties of aluminum alloys AMg10 and D16 has been established. Factors are proposed that depend on changing the structure and are directly relate to mechanical and technological properties. The influence of the parameters of the plastic deformation mode, recrystallization annealing, as well as ageing on the formation of residual stresses of the I, II, and III rind has been analysed.

*Mechanical properties, residual stresses, structural indicators, recrystallization annealing, ageing, plastic deformation.*

### Информация об авторе

**Савельева Оксана Григорьевна**, аспирант кафедры обработки металлов давлением, инженер управления инновационных программ, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [diop@ssau.ru](mailto:diop@ssau.ru). Область научных интересов: металлосплавление легких сплавов.

**Savelyeva Oksana Grigoryevna**, post graduate student of the plastic metal working department, engineer of the innovation programs board, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area research: light alloys engineering.