

## РАЗУПРОЧНЕНИЕ НАГАРТОВАННОГО СПЛАВА АМг6 ПРИ СКОРОСТНОМ НАГРЕВЕ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 100...300 °С

Ю.Д. Корягин

## SOFTENING OF COLD-WORKED AL – 6 % MG ALLOY BY FAST HEATING IN THE 100...300 °C TEMPERATURE RANGE

Yu.D. Koryagin

Экспериментально изучена и проанализирована кинетика разупрочнения нагартованного сплава АМг6 в зависимости от температурно-временных параметров скоростного нагрева в интервале температур 100...300 °С. Показано, что уменьшение предела текучести при скоростном нагреве в исследованном интервале температур происходит значительно быстрее по сравнению с изменением предела прочности, а интенсивность разупрочнения определяется температурой нагрева.

*Ключевые слова:* сплав АМг6, разупрочнение, предел прочности, предел текучести, скоростной нагрев.

Kinetics of softening of cold-worked Al–6% Mg alloy is experimentally studied and analyzed as a function of time–temperature parameters of fast heating at 100...300 °C. It is shown that fast heating in this temperature range decreases the yield strength much faster than tensile strength, the intensity of softening being determined by heating temperature.

*Keywords:* Al–6% Mg alloy, softening, tensile strength, yield strength, fast heating.

Деформируемые алюминий-магниевые сплавы находят широкое применение в нагартованном состоянии в качестве конструкционных материалов во многих областях техники, в том числе и для летательных аппаратов.

Особенностью холоднодеформированных сплавов системы алюминий-магний является их разупрочнение при выдержках при комнатной температуре и кратковременных нагревах, имеющих место при изготовлении изделий [1–5]. Ввиду того, что разупрочнение при вылеживании затрудняет гарантирование минимальных свойств нагартованных сплавов системы Al–Mg, в практике производства для ускорения разупрочнения и повышения пластичности применяют кратковременный нагрев при 120...175 °С, обеспечивая таким образом стабильность свойств. Вместе с тем в имеющейся литературе недостаточно полно освещены вопросы изменения прочностных характеристик сплавов системы Al–Mg при скоростных нагревах в интервале температур 100...300 °С.

В настоящей работе ставилась цель экспериментально оценить и проанализировать кинетику разупрочнения нагартованного сплава АМг6 в зависимости от температурно-временных параметров скоростного нагрева в интервале температур 100...300 °С.

Отожженные и деформированные со степенью 20 и 30 % образцы сплава АМг6 подвергали скоростному нагреву в печи-ванне продолжитель-

ностью до 60 мин. После нагрева осуществлялось немедленное охлаждение в воде комнатной температуры с целью фиксации созданного структурного состояния сплава. Изменение твердости обработанных образцов показано на рис. 1.

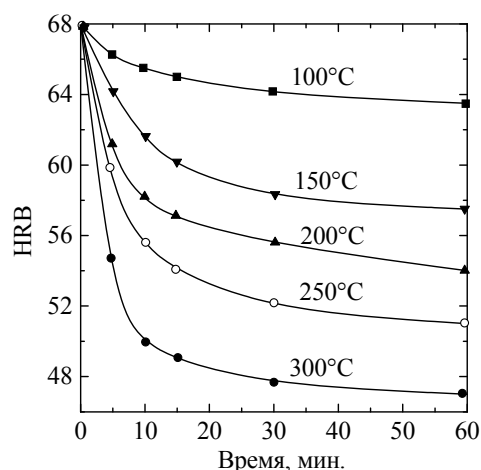


Рис. 1. Изменение твердости нагартованных образцов сплава АМг6 в процессе скоростного нагрева и выдержки при различных температурах

Как видно из рис. 1, выдержка продолжительностью до 60 мин при 100 °С приводит к незначительному уменьшению твердости нагартованного сплава АМг6. Повышение температуры нагрева интенсифицирует процессы разупрочнения. Наи-

более существенное снижение твердости холоднодеформированного сплава АМг6, как и следовало ожидать, наблюдается при нагреве до температуры 300 °С. Следует отметить, что при температурах 200...300 °С интенсивное снижение твердости наблюдается в первые 10...15 мин.

Изменение механических свойств холоднодеформированного со степенью 20 % сплава АМг6 после нагревов при 100...300 °С продолжительностью до 30 мин приведено в табл. 1. Как видно из приведенной таблицы, нагрев при температуре 100 °С продолжительностью до 30 мин не оказывает заметного влияния на уровень прочностных свойств сплава АМг6. Повышение температуры нагрева до 150 °С несколько интенсифицирует процессы возврата. Наиболее существенное снижение прочностных характеристик наблюдается в процессе исследованных выдержек при 250...300 °С.

Следует отметить, что при повышенных температурах нагрева (250...300 °С) для холоднодеформированного с обжатием 20 % сплава АМг6 наблюдается более интенсивное снижение предела текучести по сравнению с изменением предела прочности. При этом заметно возрастает пластичность сплава.

Образцы сплава АМг6, подвергнутые холодной деформации со степенью 30 %, имели более высокий уровень прочностных характеристик по сравнению с образцами, деформированными с обжатием 20 %. Выдержка деформированных образцов при температуре 100 °С продолжительностью до 60 мин привела к снижению предела прочности с 440 до 425 МПа (рис. 2), а предела текучести с 340 до 320 МПа (рис. 3). Относительное удлине-

ние при этом увеличилось с 10,3 до 14 % (рис. 4). Как и для менее упрочненных образцов (деформированных на 20 %), наиболее существенное снижение прочностных характеристик происходило в первые 10...15 мин выдержки. Повышение температуры до 150 °С сопровождалось более интенсивным снижением пределов прочности и текучести, значения которых после 10-минутной выдержки составляли 408 и 285 МПа соответственно, а после 30 мин нагрева снижались до 395 и 175 МПа. Относительное удлинение сплава после таких нагревов возрастает до 15...16 %.

Дальнейшее повышение температуры до 200...250 °С интенсифицирует процессы возврата: так, 10-минутная выдержка при 200 °С снижает прочностные характеристики сплава АМг6 до такого же значения, что и 60-минутная выдержка при 150 °С. При 250 °С примерно такой же уровень предела прочности ( $\sigma_B = 395$  МПа) достигался после 5-минутной выдержки, а значение предела текучести ( $\sigma_{0,2} = 270$  МПа) – после 2-минутного нагрева. При температуре 300 °С нагрев в течение 10 мин приводил к снижению предела прочности до 379 МПа, а предела текучести – до 220 МПа. Дальнейшее увеличение продолжительности выдержки сопровождалось монотонным снижением указанных прочностных характеристик, значения которых после 30-минутного нагрева составляли 372 и 206 МПа соответственно. Нагрев при температуре 300 °С продолжительностью 10 мин приводил к увеличению относительного удлинения с 10,3 до 20,2 %. Дальнейшая выдержка (до 1 ч) мало сказывалась на относительном удлинении сплава (см. рис. 4).

Таблица 1  
Механические свойства сплава АМг6 после нагревов при 100...300 °С

Температура выдержки, °С	Время выдержки, мин	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
100	5	419	315	12,2
	10	417	312	12,1
	15	415	309	13,1
	30	407	307	13,3
150	5	387	310	11,8
	10	383	285	14,5
	15	379	278	15,1
	30	375	275	15,9
200	5	380	266	15,1
	10	375	253	16,8
	15	370	250	17,3
	30	368	245	17,5
250	5	375	242	16,8
	10	367	231	20,1
	15	365	223	20,7
	30	363	220	21,1
300	5	370	221	20,7
	10	363	213	20,9
	15	357	201	21,6
	30	356	192	22,1

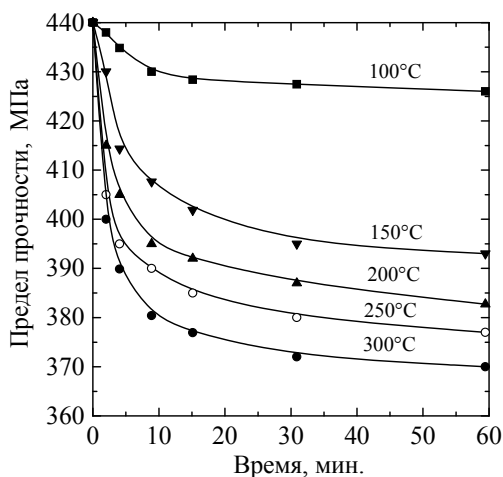


Рис. 2. Зависимость предела прочности нагартованного сплава АМг6 от температуры нагрева и продолжительности выдержки

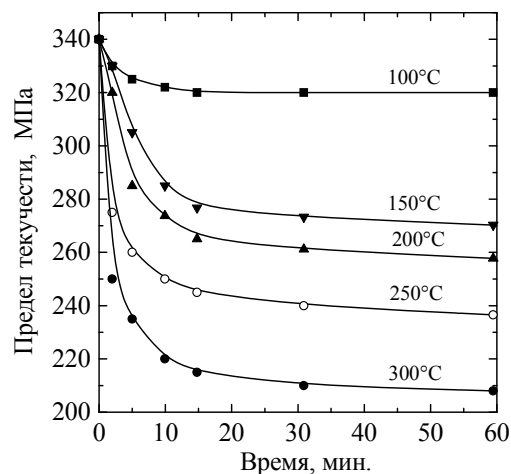


Рис. 3. Зависимость предела текучести от температуры нагрева и продолжительности выдержки

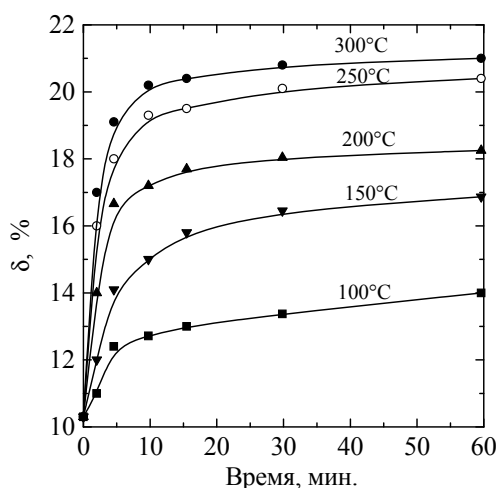


Рис. 4. Зависимость относительного удлинения от температуры нагрева и продолжительности выдержки

Анализируя полученные результаты, можно оценить влияние температуры и продолжительности нагрева на интенсивность снижения уровня прочностных свойств нагартованного сплава АМг6. При этом начальный эффект упрочнения, полученный при холодной пластической деформации, принимали за 100 % и вычисляли разупрочнение в процентах от этого эффекта. Эффект деформационного упрочнения для исследованного сплава соответственно составлял 120 МПа по пределу прочности и 165 МПа по пределу текучести. Изменение предела прочности после кратковременных нагревов в интервале температур 100...300 °С представлено в табл. 2.

Как видно из табл. 2, нагревы продолжительностью до 1 ч при 100 °С не оказывают существенного влияния на изменение предела прочности нагартованного со степенью 30 % сплава АМг6 (эффект упрочнения по  $\sigma_b$  снижается всего на 12,5 %). Пятиминутный нагрев при 150 °С приводит к уменьшению эффекта по пределу прочности

на 30,8 %, а часовой нагрев – на 39,1 %. При 200 °С 15-минутный нагрев снижает эффект упрочнения, полученный от нагартовки, на 39,1 %, а 60-минутный нагрев – на 47,5 %. Тридцатиминутный нагрев при 250 °С на 50 % уменьшает эффект по пределу прочности. При 300 °С снижение эффекта упрочнения (по пределу прочности) на 50 % наблюдается после 10-минутного нагрева.

Влияние нагрева при исследованных температурах в большей мере сказывается на уменьшении эффекта упрочнения по пределу текучести (табл. 3).

Часовой нагрев уже при 200 °С приводит к 50-процентному снижению эффекта по пределу текучести. При 250 °С снижение эффекта по пределу текучести более чем на 50 % наблюдается после 10-минутного нагрева, а при 300 °С – после 2-минутного. Пятнадцатиминутный нагрев при 300 °С на 75 % уменьшает эффект упрочнения по пределу текучести, а часовой нагрев приводит к практически полному снятию эффекта упрочнения. Как показали микроструктурные исследова-

Таблица 2

Изменение предела прочности холоднодеформированного со степенью 30 % сплава АМг6  
в процессе кратковременных нагревов при 100...300 °С

Время нагрева, мин	$\Delta\sigma_b$ , МПа (%)				
	100°С	150°С	200°С	250°С	300°С
2	2 (1,6)	10 (8,3)	25 (20,8)	35 (29,1)	40 (33,3)
5	5 (4,1)	25 (20,8)	35 (29,1)	45 (37,5)	50 (41,6)
10	10 (8,3)	32 (26,6)	45 (37,5)	51 (42,5)	60 (50)
15	13 (10,8)	37 (30,8)	47 (39,1)	55 (45,8)	62 (51,6)
30	14 (11,6)	45 (37,5)	51 (42,5)	60 (50)	67 (55,8)
60	15 (12,5)	47 (39,1)	57 (47,5)	62 (51,6)	70 (58,3)

Таблица 3

Изменение предела текучести холоднодеформированного со степенью 30 % сплава АМг6  
в процессе кратковременных нагревов при 100...300 °С

Время нагрева, мин	$\Delta\sigma_{0,2}$ , МПа (%)				
	100°С	150°С	200°С	250°С	300°С
2	8 (4,8)	10 (6,1)	20 (12,1)	57 (34,5)	90 (54,5)
5	15 (9,1)	35 (21,2)	55 (33,3)	80 (48,4)	105 (63,6)
10	18 (10,9)	55 (33,3)	67 (40,6)	90 (54,5)	120 (72,7)
15	19 (11,5)	62 (37,5)	77 (46,6)	95 (57,5)	125 (75,7)
30	20 (12,1)	65 (39,3)	78 (47,2)	98 (59,3)	130 (78,7)
60	21 (12,7)	70 (42,4)	83 (50,3)	102 (61,8)	161 (97,5)

ния нагрев при температуре 300 °С сопровождается протеканием не только процессов возврата, но и рекристаллизации, приводящих к значительному снижению прочностных характеристик и повышению пластичности сплава. Микроструктурные исследования показали, что при нагревах до 250 °С процессы рекристаллизации не получают заметного развития, а разупрочнение нагартованного сплава обусловлено в основном процессами возврата.

Таким образом, холодная деформация повышает временное сопротивление и особенно резко предел текучести сплава АМг6 при одновременном снижении пластичности. Эффект упрочнения от холодной деформации сохраняется при кратковременных нагревах вплоть до 300 °С. Разупрочнение холоднонагартованного сплава АМг6 при нагревах в интервале температур 100...300 °С наиболее интенсивно протекает в первые 5...15 минут.

#### Выводы

1. Проведено экспериментальное исследование процессов изотермического разупрочнения нагартованного сплава АМг6 при температурах 100...300 °С по изменению твердости и механических характеристик.

2. Установлено, что процессы возврата в холоднодеформированном сплаве АМг6 при нагреве в исследованном температурном интервале (100...300 °С) получают наиболее интенсивное развитие в первые 5...10 минут, снижая эффект упрочнения от холодной нагартовки, определяемый по пределу прочности: на 8...9 % при 100°С; 26...27 % при 150 °С; 37...38 % при 200 °С; 42...43 % при 250 °С и 50 % при 300 °С.

3. Показано, что уменьшение предела текучести при скоростном нагреве в исследованном интервале температур происходит значительно быстрее по сравнению с изменением предела прочности, а интенсивность разупрочнения определяется температурой нагрева. Так, при 200 °С часовая выдержка уменьшает  $\sigma_{0,2}$  с 340 до 258 МПа, а  $\sigma_b$  – с 440 до 383 МПа. При 250 °С  $\sigma_{0,2}$  за 1 ч снижается с 340 до 238 МПа, а  $\sigma_b$  – с 440 до 377 МПа.

#### Литература

1. Перриман, Э.Ч.У. Возврат механических свойств / Э.Ч.У. Перриман // Ползучесть и возврат. – М.: Металлургиздат, 1961. – С. 127–165.
2. Алюминиевые сплавы. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: справ. – М.: Металлургия, 1979. – 432 с.
3. Изучение и моделирование возврата в сплаве АМг6 с целью прогнозирования ресурса эксплуатации деталей авиакосмической техники / Д.А. Мирзаев, Ю.Д. Корягин, Я.С. Добрынина, А.А. Звонков // Физика металлов и металловедение. – 2004. – Т. 98, № 2. – С. 11–18.
4. Волков, Ю.А. Изменение свойств сплава АМг7 при хранении / Ю.А. Волков, Т.И. Соколова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1970. – № 11. – С. 32–34.
5. Промышленные алюминиевые сплавы: справ. изд. / С.Г. Алиева, М.Б. Альтман, С.М. Амбарцумян и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1984. – 528 с.

Поступила в редакцию 24 февраля 2012 г.