

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1420, ПОДВЕРГНУТОГО ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ, СОВМЕЩЕННОЙ С ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Ю.Д. Корягин, В.И. Крайнов, В.Л. Ильичев

Исследованы пластические характеристики и сопротивление деформации алюминиевого сплава 1420. Установлено, что гомогенизированные слитки сплава имеют низкие пластические характеристики в условиях деформации, соответствующих процессам ОМД. В предварительно деформированном состоянии пластичность сплава повышается. Отмечается расширение интервала максимальной пластичности при более мягких схемах напряженного состояния. Получены кривые упрочнения сплава в литом состоянии и для подкатов 120 мм и 20 мм для термомеханических параметров $v_c=3-30 \text{ с}^{-1}$; $\varepsilon_1=0,2-0,6$; $t=300-400 \text{ }^\circ\text{C}$. Изучено влияние режимов термомеханической обработки на структуру и свойства сплава 1420. Показано, что наиболее значительный эффект повышения прочностных характеристик сплава 1420 обеспечивает режим НТМО с деформацией в области температур оптимального старения. Данные результаты могут быть использованы для расчетов режимов горячей деформации сплава и выбора режима термообработки для получения оптимальных эффектов упрочнения.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, пластическая деформация, пластометрические исследования, термомеханическая обработка, механические свойства.

Проблема снижения массы конструкции летательного аппарата в первую очередь связана с уменьшением плотности конструкционных материалов. Поэтому использование литья, обладающего минимальной из всех металлов плотностью для легирования алюминиевых сплавов весьма актуально. Литий является уникальным легирующим компонентом, одновременно снижающим плотность сплава и увеличивающим его модуль упругости [1, 2].

В результате исследования системы Al-Mg-Li был создан отечественный сплав 1420 и проведены систематические исследования его структуры и свойств [3–5]. С целью формирования повышенных механических характеристик алюминиевого сплава 1420 были проведены пластометрические исследования, а также оценено влияние режимов прокатки и последующей термомеханической обработки на структуру и упрочнение сплава 1420.

Для исследования использован материал гомогенизированных слитков из подката толщиной 120 мм и из подката толщиной 20 мм.

Пластические характеристики и сопротивление деформации определяли при испытаниях на растяжение и сжатие цилиндрических образцов. Растяжение проводили на установке «Инстрон», сжатие – на пластометре ЮУрГУ [6, 7]. Методика экспериментов и обработки их результатов на растяжение были стандартными. На сжатие испытывались образцы $d_0 \times h_0 = 10 \times 16$ мм, на растяжение – $d_0 \times l_0 = 5 \times 25$ мм.

Степень деформации сдвига до разрушения Λ_p в испытаниях на растяжение определяли по формуле:

$$\Lambda_p = 2\sqrt{3} \ln \frac{d_0}{d_p},$$

где d_0 , d_p – диаметр исходного образца и диаметр шейки при разрушении соответственно. При этом коэффициент напряженного состояния имеет значение вблизи $\sim +0,58$.

Микроструктуру образцов сплава изучали на оптическом микроскопе «Neophot –21» и сканирующем электронном растровом микроскопе фирмы «Jeol» JSM – 6460 LV, оборудованном энергодисперсионным анализатором фирмы «Oxford Instrument», имеющим максимальное увеличение $\times 300000$ и разрешение 3 нм.

Рентгеноструктурные исследования проводили на дифрактометре типа ДРОН-3. Электропроводность образцов измеряли на установке ИЭ-1, имеющей предел измерений 12-62 мк ом, на плоских образцах.

Твёрдость измеряли на приборе ТШ при нагрузке 2450 Н шариком $\varnothing 5$ мм и на приборе Роквелла ТК-2 при нагрузке 100 кг (980 Н).

Исследованиями установлено, что материал из гомогенизированных слитков сплава 1420 имеет низкие пластические характеристики при температурно–скоростных условиях, соответствующих процессам ОМД и при схемах с преобладанием растягивающих напряжений. Максимум пластических характеристик приходится на область температур 360–400 °С. Температурная характеристика пластичности для подката 180 мм из сплава 1420, полученная в испытаниях на растяжение при жёстких схемах напряженного состояния, значительно выше, чем для исходного гомогенизированного слитка. Особенно это относится к интервалу максимальной пластичности. Обращает на себя внимание сдвиг температуры максимума пластичности подката 1420 к большим температурам по сравнению с положением максимума пластичности материала из слитков.

Результаты испытаний на растяжение (табл. 1) дают представление о положении интервалов максимальной пластичности исследованного сплава при жёстких схемах напряженного состояния и о значениях характеристик пластичности в этих областях. Здесь же приведены рекомендуемые температурные интервалы горячей деформации из сплава 1420 и исходном горячедеформированном состоянии.

Таблица 1

Интервалы максимальной пластичности материала
из подкатов толщиной 120 мм сплава 1420
по результатам испытаний на растяжение ($u=5c^{-1}$, $\sigma/T= +0,58$)

Характеристика максимума по A_p				Характеристика максимума по δ_5				Интервал температур горячей деформации при $\sigma/T=+0,58$, °C
t_{max} , °C	A_p	Интервал температур макс. A_p , °C		t_{max} , °C	δ_5 , %	Интервал температур макс. δ_5 , °C		
		$A_p \geq 1,0$	$A_p \geq 1,2$			$\delta_5 \geq 30$	$\delta_5 \geq 35$	
410	1,5	355–438	370–430	390	40	335–430	355–415	355–415

Значения A_p в интервалах максимальной пластичности, полученные в испытаниях на сжатие цилиндрических образцов (при достаточно мягкой схеме напряженного состояния), по крайней мере не превосходят таких значений, полученных в испытаниях на растяжение – и это несмотря на более мягкую схему напряжённого состояния в первом случае.

В то же время вне интервала максимальной пластичности A_p сжатие $> A_p$ растяжение. Это говорит о расширении интервала максимальной пластичности при более мягких схемах напряженного состояния.

Увеличение скорости деформации с $5 c^{-1}$ до $30 c^{-1}$ приводит к снижению пластичности сплава 1420, при этом степень деформации сдвига до разрушения при $\sigma/T_c=0$ снижается в среднем на 10 %.

Снижение толщины подката для сплава 1420 со 120 мм до 20 мм привело к повышению величины A_p материала при $\sigma/T=0$ в среднем на 20–25 %.

Одновременно расширяется интервал температур максимальной пластичности металла. Таким образом, горячая прокатка сплава 1420 существенно увеличивает его пластические характеристики.

Для сплава 1420 характерно:

- образование одной шейки при растяжении; шейнообразование выраженное, доля равномерного сужения мала;
- характер излома при разрыве в области максимума в виде «чашечки-конуса», на границах интервала максимальной пластичности под углом 45° ;

– нередкое образование трещин в испытаниях на растяжение по всей рабочей поверхности, а не только в области шейки. Обычно трещины проявляются по рабочей длине образца в виде попарно перекрещивающихся под углом 45° к оси образца небольших подкатов. Это влияет на величину измеренного относительно удлинения в сторону его завышения.

Кривые упрочнения для литого состояния сплава 1420, полученные по результатам испытаний на растяжение, для всех температур, начиная с температуры с $t = 350^\circ\text{C}$, имеют ясновыраженный участок разупрочнения, следующий за максимумом сопротивления деформации. Следует отметить, что при этом сопротивление деформации зависит только от температурного фактора.

Кривые упрочнения для исходного горячекатанного состояния сплавов типа 1420 имеют тот же характер, что и для литого состояния. При этом появилась зависимость сопротивления деформации от скорости деформации для подкатов толщиной 120 и 20 мм, а для образцов из подката 20 мм – и степени конечной деформации.

Зависимости для расчёта среднего сопротивления деформации для сплава 1420 имеют вид:

литое состояние – $\delta_{sc} = 848 \cdot \exp(-0,00477t)$;

подкат 120 мм – $\delta_{sc} = 862 \cdot u_c^{0,0813} \exp(-0,00475t)$;

подкат 20 мм – $\delta_{sc} = 837 \cdot u_c^{0,1063} \varepsilon_1^{-0,0495} \exp(-0,00475t)$;

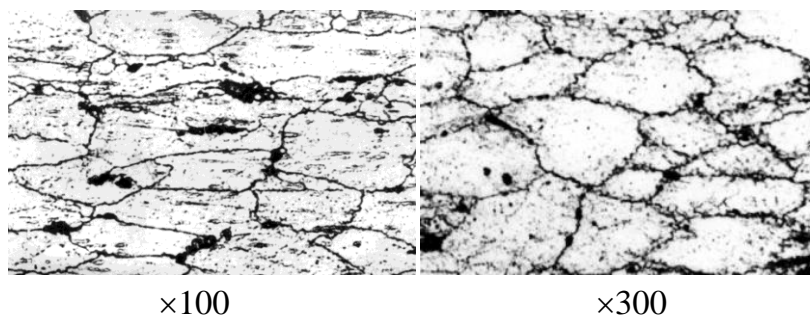
для интервалов варьирования $u_c = 3-30 \text{ с}^{-1}$; $\varepsilon_1 = 0,2-0,6$; $t = 300-400^\circ\text{C}$.

При термомеханической обработке основные эксперименты осуществляли на образцах размерами $15 \times 15 \times 140$ мм, вырезанных из штамповок, полученных из слитков промышленных плавов сплава 1420 химического состава (мас. %): 5,26 % Mg; 2,06 % Li; 0,05 % Mn; 0,069 % Si; 0,073 % Fe; 0,096 % Zr; 0,018 % Cu; 0,01 Ti, остальное – алюминий).

Микроструктура сплавов в исходном состоянии приведена на рис. и представляет собой неравноосные зерна, ориентированные в направлении деформации при штамповке. Горячая деформация сопровождается образованием субзерен с размерами в пределах 2–4 мкм. Внутри субзерен плотность дислокаций невелика. В структуре наблюдаются также включения в виде частиц, которые можно интерпретировать как выделения S-фазы (Al_2MgLi), хотя не исключено, что некоторые из них являются частицами фазы γ ($\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$) [5, 8].

Изменение параметра решетки и удельного электросопротивления подтверждает наличие распада пересыщенного твердого раствора сплава 1420 (табл. 2).

Уменьшение параметра решетки твердого раствора сплава 1420 после рассмотренных режимов деформирования связано с обеднением его легирующими элементами (магнием и литием), имеющими атомные радиусы большие, чем алюминий.



Микроструктура сплавов 1420 после закалки и ВТМО

Деформация при температуре гомогенизации, напротив, несколько увеличивает как удельное электросопротивление, так и постоянную решетки (табл. 2). Этот эффект связывают с более полным растворением во время высокотемпературной деформации фаз, не успевших перейти в твердый раствор в процессе гомогенизации.

Таблица 2

Изменение параметра решетки твердого раствора (a)
и удельного электросопротивления (ρ) сплава 1420
в зависимости от температуры деформации

Параметры	Закалка	Деформация				
		20 °С, 15 %	20 °С, 30 %	150 °С, 30 %	170 °С, 30 %	450 °С, 30 %
a , нм	0,4065	0,4064	0,4063	0,4062	0,4063	0,4066
ρ , мкОм·м	0,1250	0,1232	0,1214	0,1182	0,1185	0,1271

Интенсификация процессов выделения и сохранение повышенной плотности дислокаций способствует повышению твердости деформированного сплава 1420 во время старения при 120–170 °С. Максимальный уровень твердости недеформированных образцов (~80 HRB) наблюдается после 16–24 часов старения при 150 °С и после 12–16 часов старения при 170 °С. У образцов, деформированных при температуре гомогенизации (450 °С), максимум твердости (~82 HRB) достигается при 170 °С за 10–12 часов. Наибольшее и примерно одинаковое упрочнение образцов (~85 HRB), деформированных с обжатием 30 % при 150 °С.

Свойства сплава 1420 изучали после искусственного старения при температурах 150 и 170 °С с выдержками до 24 и 12 ч соответственно. Из табл. 3 можно видеть, что изменение пределов текучести и прочности аналогично изменению твердости. Обращает на себя внимание также относительно небольшое изменение свойств сплавов, подвергнутых НТМО, с увеличением продолжительности старения в пределах исследованных выдержек. Это в

некоторой мере обусловлено высокой исходной прочностью, но главная причина заключается, видимо, в том, что интенсивное развитие процессов старения и роста прочностных свойств наблюдается в ходе обработки и на начальных стадиях выдержки.

Таблица 3

Механические свойства сплава 1420 после старения

Обработка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	KCV, кДж/м ²
450 °С – 1,5 ч, вода +150 °С – 8 ч	480	360	7,2	99
12 ч	485	365	6,8	95
16 ч	490	370	6,8	–
24 ч	495	380	6,5	90
170 °С – 8 ч	515	400	6,9	91
12 ч	520	402	6,8	86
16 ч	522	405	6,5	85
24 ч	525	405	6,4	82
450 °С – 1,5 ч, вода +деф.30 % при 20 °С + 150 °С – 8 ч	520	415	5,8	65
12 ч	525	420	5,3	57
16 ч	525	422	5,0	49
24 ч	530	425	4,5	46
170 °С – 4 ч	538	435	5,2	67
8 ч	540	437	5,0	62
12 ч	542	440	4,6	55
16 ч	535	432	4,5	55
24 ч	530	425	4,6	60
450 °С – 1,5ч, вода +деф.30 % при 150 °С + 150 °С – 8 ч	525	425	5,9	82
12 ч	530	430	5,8	79
16 ч	535	435	5,7	73
24 ч	540	440	5,7	70
170 °С – 4 ч	545	445	5,6	81
8 ч	548	447	5,2	75
12 ч	550	450	5,0	70
16 ч	545	445	5,1	70
24 ч	538	440	5,2	73
450 °С – 1,5 ч, деф. 30 % ,вода + 150 °С – 8 ч	505	380	8,7	104
12 ч	510	385	8,3	101
16 ч	512	390	8,1	97
24 ч	515	395	8,0	95
170 °С – 8 ч	530	417	8,5	100
12 ч	535	425	8,4	98
16 ч	535	423	8,0	91
24 ч	530	420	7,9	90

Учитывая температурные режимы, используемые в производственных условиях, проведём сравнение изучаемых вариантов обработок после 12-часовой выдержки при 170 °С.

Наибольшее повышение прочностных свойств сплава 1420 обеспечивает прокатка при 150 °С с обжатием 30 %. После такой обработки значения пределов текучести и прочности повышаются на 35–50 МПа (8–12 %) и 13–35 МПа (2–7 %) соответственно. Упрочнение сплава при НТМО сопровождается снижением относительного удлинения (δ) на 33 и 26 %, а также уменьшением КСВ на 37–44 % (холодная деформация) и 18–22 % (деформация при 150 °С). Важно отметить, что при использовании деформации при 150 °С формируется более благоприятное соотношение между прочностными характеристиками, пластичностью и ударной вязкостью, чем при холодном наклепе.

ВТМО, хотя и значительно слабее, чем НТМО, но вполне ощутимо повышает прочностные свойства сплава 1420: по сравнению с недеформированным состоянием пределы текучести и прочности возрастают на 15–20 МПа, т.е. на 2,5–4,5 %. Одновременно после такой обработки увеличивается пластичность на 6–23 % и ударная вязкость на 14–28 %.

Отсутствие значительного дополнительного упрочнения от термомеханической обработки сплава 1420, по-видимому, связано со спецификой распада пересыщенного твердого раствора: после старения в структуре сплавов наблюдается очень высокая плотность высокодисперсных частиц δ' -фазы. Возможно, что в условиях высокой плотности выделений увеличение количества частиц, обусловленное интенсификацией процессов старения после ВТМО, мало сказывается на межчастичном расстоянии.

Заключение

1. Горячая деформация слитков сплава 1420 приводит к увеличению характеристик динамической пластичности, расширению интервалов температур максимальной пластичности и снижению сопротивления деформации.

2. Полученные данные о характеристиках пластичности и сопротивления деформации могут быть непосредственно использованы в расчете режимов горячей прокатки для введения ограничений обжатий слитков и подкатов по пластичности и энергосиловым параметрам.

3. Наиболее значительное повышение прочностных характеристик алюминий-магний-литиевого сплава 1420 обеспечивает НТМО с деформацией в районе температур оптимального старения.

4. ВТМО обеспечивает незначительное повышение прочностных свойств сплава 1420 (σ_B и $\sigma_{0,2}$ возрастают на 2,5–4,5 %). Но эта обработка заметно увеличивает их пластичность (на 6–23 %) и повышает ударную вязкость (на 13–28 %).

Библиографический список

1. Легкие сплавы, содержащие литий / М.Е. Дриц, Е.М. Падежнова, Л.Л. Рохлин и др. – М.: Наука, 1982. – 144 с.
2. Сандлер, В.С. Особенности структуры и свойства алюминиевого сплава 1420 / В.С. Сандлер, И.Н. Фридляндер, С.М. Амбарцумян и др. // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1983. – № 7. – С. 20–22.
3. Рентгеноструктурное и электронно-микроскопическое исследование кинетики сплава 01420 / И.Н. Фридляндер, В.С. Сандлер, Т.И. Никольская и др. // *Авиационные материалы.* – 1980. – Вып. 4. – С. 52–59.
4. Влияние температуры пластической деформации на механические свойства сплава 01420 / Н.Т. Карева, М.А. Смирнов, Г.Е. Гольдбухт и др. // *Авиационные материалы.* – 1980. – Вып. 7. – С. 52–59.
5. Фридляндер, И.Н. Сплав 1420 системы Al – Mg – Li / И.Н. Фридляндер, В.С. Сандлер // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1988. – № 8. – С. 28–36.
6. Пластометрические исследования на автоматизированном цифровом пластометре: учебное пособие для самостоятельной работы / сост. В.И. Крайнов, В.С. Кропачев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 25 с.
7. Пластометр для исследования деформируемости металлов: методические указания к выполнению лабораторных работ / сост. В.Г. Дукмасов, В.И. Крайнов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 36 с.
8. Lapasset G. Influence de facteurs métallurgiques de la tenacité des alliages d'aluminium 7010 et 7050 / G. Lapasset, C. Renon // *La Recherche Aérospatiale.* – 1982. – № 5. – Pp. 313–326.

[К содержанию](#)