

О СТРУКТУРЕ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ СПЛАВА АЦ6Н0,5Ж

П. К. Шуркин¹, Н. А. Белов¹, Т. К. Акопян^{1, 2}

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,

² Институт металлургии и материаловедения РАН им. А. А. Байкова,
г. Москва, Россия

В этой статье обоснована принципиальная возможность получения тонколистового проката из сплава АЦ6Н0,5Ж на базе эвтектики (Al)+Al₉FeNi со свойствами, не уступающим марочным сплавам типа В95.

Ключевые слова: высокопрочный алюминиевый сплав, эвтектические сплавы, тонколистовой прокат

ABOUT THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF ALLOY ATS6N0,5ZH ROLLED PRODUCTS

P. K. Shurkin¹, N. A. Belov¹, T. K. Akopyan^{1, 2}

¹ National University of Science and Technology «MISIS»,

² IMET RAS. A. A. Baikov, Moscow, Russia

This article is justified in principle possible to obtain rolled products of alloy ATS6N0,5ZH based eutectic (Al) + Al₉FeNi with properties that are not inferior to branded type alloy V95.

Ключевые слова: high-strength aluminium alloy, eutectic alloys, rolled products

Повышение прочности в существующих высокопрочных алюминиевых сплавах типа В96/В96ц–3 достигается за счет увеличения концентраций цинка, магния и меди, что приводит к снижению пластичности, трещиностойкости, коррозионной стойкости и повышению чувствительности к примесям, в частности к железу [1 – 3]. Поэтому появляется тенденция к использованию сплавов типа «оч» и «пч», что вынуждает использовать высокочистые шихтовые материалы и более мягкие режимы старения (Т2 вместо Т1) и приводит к потере прочности и повышению стоимости сплава, соответственно. Кроме того, данные высокопрочные сплавы отличаются низкой технологичностью, в частности, при литье слитков, обработке давлением и сварке плавлением [3].

Экономнолегированные никелины на базе системы Al-Zn-Mg-Cu-Fe-Ni, разработанные в начале 21 века на базе НИТУ «МИСиС», являются уникальным материалом для производства литых изделий и деформированных полуфабрикатов. Предва-

рительные исследования, проведенные в [3 – 5] установили, что механические свойства никелинов с железом находятся на уровне марочных сплавов типа В96/В96ц–3, а по некоторым параметрам даже превосходят их. Высокие прочностные характеристики в сочетании с удовлетворительной пластичностью в сплаве АЦ6Н0,5Ж достигаются за счет равномерного распределения по алюминиевой матрице компактных частиц Al₉FeNi из эвтектики (Al) + Al₉FeNi после закалки и выделения наноразмерных дисперсоидов после старения. Идея заключается в том, что именно частицы Al₉FeNi позволяют получать тонколистовой прокат без разрывов и трещин при хорошем сочетании пластичности и прочности после упрочняющей термообработки, а также хороших технологических свойств (жидкотекучесть, горячеломкость, свариваемость).

Работы, проведенные при разработке сплава позволили выбрать режим деформационно-термической обработки для получения максимально благоприятного сочетания

высокой прочности и удовлетворительной пластичности [6]:

- получение плоского слитка, толщиной 15 мм;
- гомогенизационный отжиг слитка по режиму 450°C , 3ч + 530°C , 3 ч, охлаждение на воздухе;
- горячая прокатка гомогенизированного слитка до толщины 2 мм;
- промежуточный отжиг горячекатаного листа по режиму 400°C , 1 ч, охлаждение на воздухе;
- холодная прокатка до примерной толщины 1 мм (получение тонколистового проката);
- нагрев под закалку 450°C , 1 ч охлаждение в воде;
- старение по двум режимам: а) Т6 – старение на максимальную прочность 120°C – 3 ч. + 160°C – 3 ч. (вместо трехступенчатого в течение суток у сплавов типа В96ц-3); б) Т4 – естественное старение в течение суток.

Выплавка сплава осуществлялась в соответствии с техническими условиями на плавку никелинов в индукционной печи ППИ 0,017 фирмы РЭЛТЕК. В качестве шихтовых материалов выступали: алюминий (А85); чистые материалы – цинк (Ц0), магний (Мг90); медь (М1); лигатуры Al-10%Fe и Al-20%Ni. Разливку проводили при температуре $720 - 740^{\circ}\text{C}$ в графитовые изложницы и получали плоские слитки с габаритными размерами $10 \times 40 \times 180$ мм и $15 \times 60 \times 180$ мм. Химический

анализ проводился на эмиссионном оптическом спектрометре THERMO FISHER ARL 4460 OES. Результаты химического анализа представлены в таблице 1. Термическую обработку отливок и листов проводили в муфельных электрических печах SNOL 8,2/1100 и SNOL 58/350 с точностью поддержания температуры около 3 К. После термообработки слитки прокатывались при температуре 450°C до толщины 2 мм. Далее горячекатаные листы термически обрабатывались для снятия наклепа и проводилась их прокатка при комнатной температуре на вальцах до толщины 1 мм. Микроструктуру литых и термообработанных образцов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 (СЭМ). Шлифы готовили способом механической полировки и последующей электрополировки. EBSD (Electron Backscatter Diffraction) анализ проводился на просвечивающем электронном микроскопе JEM 1400. Твердость слитков из сплава АЦ6Н0,5Ж определяли по Бриннелю (ГОСТ 9012-59). Индентор – стальной шарик диаметром 2,5 мм, на который подавалась нагрузка в 62,5 кгс при выдержке в течение 12 секунд. Твердость листов измеряли по методу Виккерса (ГОСТ 2999 – 75) при нагрузке 5 кгс, время выдержки – 12 секунд. Для измерений использовался универсальный твердомер NEMESIS 9000. Прочностные характеристики исследовались на универсальной испытательной машине Z250 Zwick/Roell.

Таблица 1 – Химический состав модельного сплава Al-6,5Zn-2,5Mg-0,2Cu-0,5Fe-0,6Ni

Сплав	Содержание легирующих элементов, масс. %						
	Zn	Mg	Ni	Fe	Cu	Si	Al
АЦ6Н0,5Ж	6,176	2,339	0,753	0,658	0,254	0,068	ост.

Микроструктура отливок в литом состоянии (рисунок 4а) включает в себя алюминиевый твердый раствор, частицы фазы Al_9FeNi эвтектического происхождения, и расположенная по границам этих частиц метастабильная фаза T ($\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$). После отжига фаза T растворяется в матрице, как и другие элементы, а фаза Al_9FeNi приняла относительно компактную форму (рисунок 4б). При этом размер частиц уменьшается в 1,5 – 2 раза от 2 – 5 мкм до 0,5 – 2 мкм, а количество частиц повышается с 4 % до 8 % относительно

фотографии микроструктуры, соответственно. Твердость слитков в литом состоянии составляет около 125 НВ и после отжига существенно не меняется.

Листы после горячей прокатки и последующей холодной прокатки не имели разрывов, трещин и прочих видимых дефектов. После горячей прокатки был проведен промежуточный отжиг, после чего выполнялась операция холодной прокатки на вальцах. В результате были получены листы толщиной 1 мм (рисунок 2).

О СТРУКТУРЕ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ
ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ СПЛАВА АЦ6Н0,5Ж

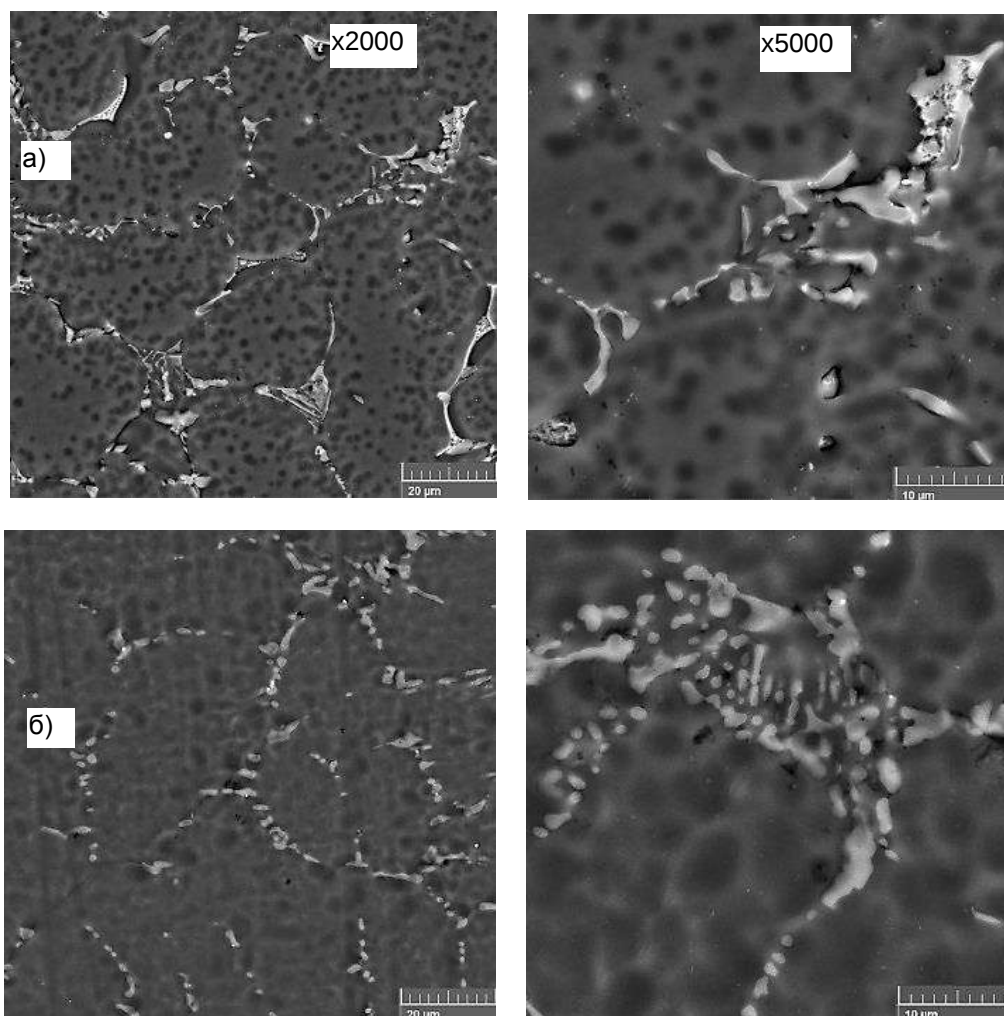


Рисунок 1 – Микроструктуры модельного сплава Al-6,5Zn-2,5Mg-0,2Cu-0,5Fe-0,6Ni(СЭМ):
а) в литом состоянии; б) после двухступенчатого гомогенизирующего отжига



Рисунок 2 – Тонколистовой прокат из модельного сплава Al-6,5Zn-2,5Mg-0,2Cu-0,5Fe-0,6Ni

Известно, что наличие отдельных сплюснутых фаз после прокатки образуют строчки и являются концентраторами напряжений, приводящих к разрывам, что недопустимо в марочных деформируемых сплавах [3]. Сплав АЦ6Н0,5Ж предлагает решить эту проблему с помощью равномерного распределения большого количества строчек из фазы Al_9FeNi , что позволяет избежать явных концентраторов и располагает

равномерной пластической деформации (рисунок 3). При этом размер частиц Al_9FeNi составляет примерно 1 мкм. Максимальная твердость достигается у холоднокатаных листов толщиной 1 мм в состоянии Т6 в результате выделения упрочняющих наноразмерных дисперсоидов – 180 HV. После термической обработки по режиму Т4 твердость составляет 140 HV, что является удовлетворительным показателем.

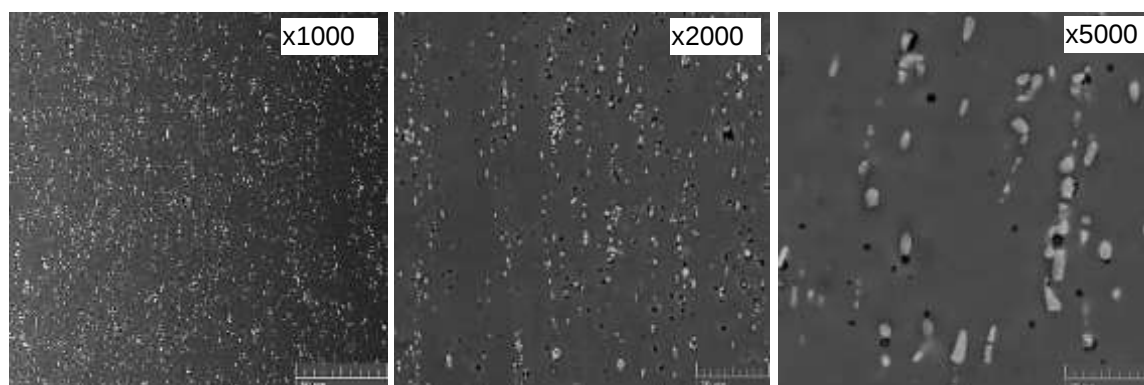


Рисунок 3 – Микроструктуры холоднокатанного листа из сплава АЦ6Н0,5Ж после термической обработки по режиму Т6 (СЭМ)

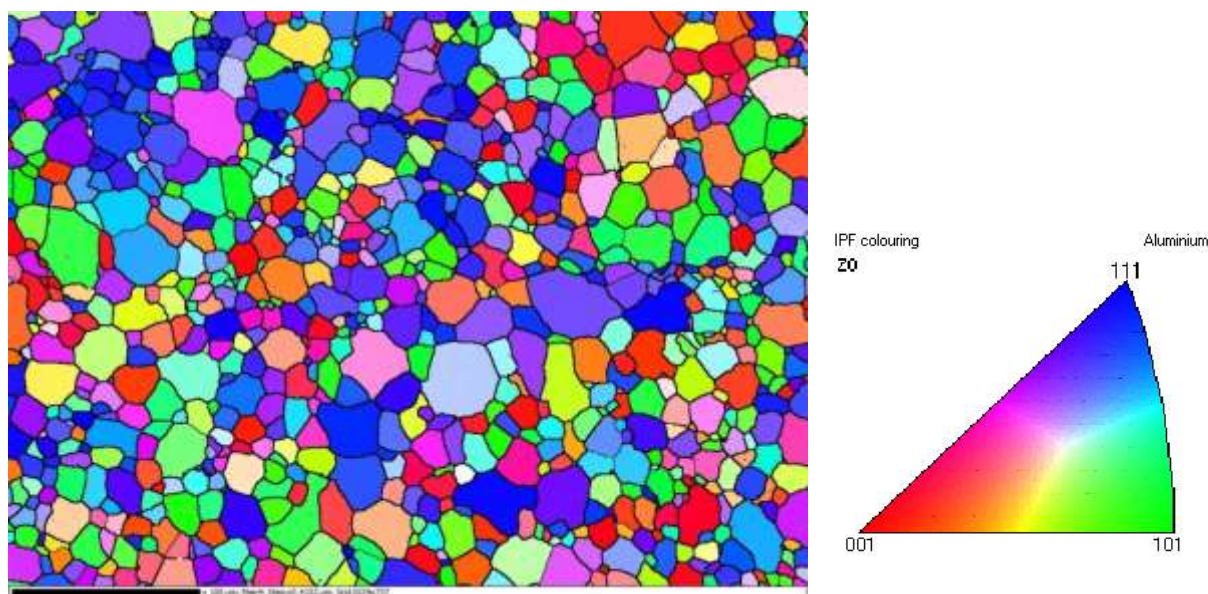


Рисунок 4 – EBSD карта микроструктуры листа 1 мм в состоянии Т6 сплава Al-6,5Zn-2,5Mg-0,2Cu-0,5Fe-0,6Ni

О СТРУКТУРЕ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ СПЛАВА АЦ6Н0,5Ж

Анализ EBSD карты микроструктуры (рисунк 5) после прокатки и термообработки Т6 показал, что произошла рекристаллизация, из за чего могут быть потери в прочности. Зеренная структура характеризуется равноосностью при размерах, не превышающих 20 мкм. Причем преобладающий размер зерен составляет 5 мкм, что является хорошим основанием для высоких механических свойств.

В качестве выходных параметров при определении прочностных характеристик по-

лучали предел прочности, текучести, модуль Юнга, относительную деформацию при растяжении (таблица 2). Испытания проводились на трех образцах для каждого режима термообработки в соответствии с ГОСТ 1497-84. Результаты испытаний показали, что экспериментальный сплав имеет хорошее сочетание прочности и пластичности. Листы в состоянии Т6 имеют временное сопротивление 516 МПа, в состоянии Т4 – 482 МПа, что не уступает показателям марочных сплавов.

Таблица 2 – Результаты измерения прочностных характеристик холоднокатанных листов 1 мм из модельного сплава Al-6,5Zn-2,5Mg-0,2Cu-0,5Fe-0,6Ni

Толщина листа и режим термической обработки	Прочностные характеристики				
	№ обр.	Модуль Юнга Е, ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	Отн. удлинение ϵ , %
Лист толщиной 1 мм в состоянии Т6	1	64	470	509	8,80
	2	74	457	511	5,20
	3	68	488	529	7,10
Среднее значение		68	471	516	7,03
Лист толщиной 1 мм в состоянии Т4	1	55	296	431	8,80
	2	64	317	464	8,90
	3	65	329	482	10,00
Среднее значение		65	314	459	9,23

Заключение:

1. В результате плавки и литья получили слитки требуемого химического состава Al-6,5Zn-2,5Mg-0,2Cu-0,5Fe-0,6Ni: ЭЛАС с повышенным содержанием железа на базе эвтектики (Al)+Al₃FeNi. Установлено, что после двухступенчатого гомогенизационного отжига частицы Al₃FeNi принимают форму, близкую к глобулярной с размерами 1 – 2 мкм и количеством, в 2 раза превышающим литой вариант, что является признаком когерентности с матрицей и, как правило, хороших пластических свойствах сплава и пригодности к прокатке.

2. Установлена высокая технологичность слитков при горячей и холодной прокатке, что дает возможность получения тонколистового проката без трещин и других видимых дефектов. Микроструктура листов после упрочняющей термической обработки содержит алюминиевую матрицу (Al) и большое количество строчек из равномерно распределенных компактных частиц Al₃FeNi размером до 1 мкм, что позволяет избежать явных концентраторов напряжений в виде отдельных строчек, которые недопустимы в марочных сплавах.

3. В результате EBSD анализа микроструктуры выяснили, что зерна после рекри-

сталлизации, получают равноосными при преобладающем размере 10 мкм, что является благоприятным относительно пластичности.

4. По результатам испытаний на одноосное растяжение при комнатной температуре листы из сплава заявленного состава имеют хорошее сочетание прочности и пластичности. Прочность и твердость в состоянии Т6 равны 515 МПа и 180 НВ, относительное удлинение – 7 %. В Т4 прочность – 460 МПа, твердость – 140 НВ, удлинение – 9 %. Данные показатели соответствуют уровню свойств марочных высокопрочных алюминиевых сплавов. Для повышения уровня механических свойств листов планируется использовать такие приемы, как дополнительное легирование(Sc, Zr и др.) и изменение режимов термообработки.

Работа выполнена в рамках государственной работы «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок)» государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности на 2014-2016 гг. (Задание № 2014/113).

Список литературы

1. Белов, Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов - М.: Издательский Дом МИСиС, 2010. - 511 с.
2. Золоторевский, В. С. Металловедение литейных алюминиевых сплавов / В. С. Золоторевский, Н. А. Белов. - М.: МИСиС», 2005. - 376 с.
3. Белов, Н.А. О технологичности высокопрочного экономнолегированного никалина АЦ6Н0,5Ж при литье, прокатке и сварке / Н.А. Белов, М.В. Щербаков, В.Д. Белов // Цветные металлы. – 2011. - №12. - С.94-98.
4. Белов Н.А. Экономнолегированные высокопрочные деформируемые никалины – алюминиевые сплавы нового поколения / Н.А. Белов, В.Д. Белов, В.В. Чеверикин, С.С. Мишуров // Известия вузов. Цв.мет. – 2011. - №2. - С.49-58.
5. Белов, Н.А. Экономнолегированные высокопрочные алюминиевые сплавы: принципы оптимизации фазового состава / Металловедение и термическая обработка металлов – 2011 - № 9, - С.19-27.
6. Пат. РФ № 2484168, опубл. 10.06.2013 Бюл. № 16

Шуркин П. К. ¹ – магистрант
Белов Николай Александрович ¹ – д.т.н., профессор
Акопян Т. К. ^{1,2} – с. н. с.

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»)

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова)