УДК 669.2:539.5

ПОЛУЧЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг10 С УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ ПРОКАТКОЙ ПО АRB-МЕТОДУ

© 2013 Ф.В. Гречников, И.П. Попов, Я.А. Ерисов

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

Поступила в редакцию 09.04.2013

В данной статье на примере алюминиевого сплава AMr10 рассмотрено получение ультрамелкозернистой структуры при прокатке по ARB-методу, который заключается в прокатке пакета из двух листов с обжатием не менее 50%, в последующем разделении проката на две половины, их соединении и повторной прокатке и т.д.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, АМг10, интенсивная пластическая деформация, прокатка, ARB-метод, микроструктура, ультра мелкое зерно.

введение

Сегодня во многих отраслях наблюдается интенсивное развитие исследований в области "нанотехнологий". В металлургическом производстве это является реакцией на состояние, близкое к исчерпыванию возможностей создания требуемых свойств у сплавов традиционными методами. Еще великий русский металлург Д.К. Чернов указывал, что в литом металле можно получить свойства деформированного металла, если создать при затвердевании ультрамелкозернистую структуру [1]. Таким образом, минимизация зерна – это путь к возможной отмене всех процессов обработки металлов давлением вообще.

Уменьшение размеров частиц, составляющих объект, придает ему в целом новые свойства. Это вызвано: во-первых, влиянием развитых границ, т.к. приграничные условия отличаются от внутризеренных; а во-вторых, отсутствием внутри зерна условий, которые проявляются в большом объеме. Поэтому наноразмеры зерен способны придать при сохраняющемся химическом составе существенно новые качества тому же самому сплаву.

В настоящее время еще не изучен действительный тонкий механизм указанного влияния. Но некоторые проявления в виде отдельных аномально высоких свойств обнаруживаются [2-3]. Поэтому предсказания Д.К. Чернова сбываются и проявляются в виде развития нового мощного направления – создания объемных наноструктурированных кристаллических материалов. Получение металлических наноматериалов в виде заготовок с объемом, достаточным для производства изделий, может быть осуществлено тремя путями: компактированием порошков с наноразмерными частицами, интенсивной пластической деформацией и специальными способами литья [4].

Наиболее привлекательным способом получения объемных нанокристаллических материалов является интенсивная пластическая деформация, которая заключается в многократном деформировании обрабатываемых материалов в условиях близких к простому сдвигу. Основными методами, с помощью которых достигаются большие деформации, приводящие к заметному измельчению зерна без разрушения образца, являются проглаживание поверхности твердым индентором, кручение под высоким давлением, равноканальное угловое прессование, всесторонняя ковка, "винтовое" прессование и т.д. [5].

С одной стороны, вышеперечисленные методы интенсивной пластической деформации позволяют наряду с уменьшением среднего размера зерна получать массивные образцы с практически беспористой структурой, что невозможно достичь компактированием высокодисперсных порошков. С другой – их основным недостатком является низкая производительность, что сдерживает промышленное производство изделий с достоинствами свойств, присущих наноструктуре.

Поэтому в последние годы широкое применение приобрели высокоэффективные способы получения ультрамелкозернистых материалов на основе процессов прокатки и прессования [6-7], в том числе ассиметричная прокатка и прокатка по ARBметоду (accumulative roll bonding) [8]. В последнем подходе используется близкая по своей сути технологическая схема многоцикловой пакетной прокатки, что позволяет использовать традиционные вы-

Fedor Grechnikov, Corresponding Member of RAS, Doctor of Technics, Professor, Vice-Rector for Academic Affairs. E-mail: gretch@ssau.ru

Igor Popov, Doctor of Technics, professor, Professor at the Metal Forming Department. E-mail: igr_popov@mail.ru Yaroslav Erisov, of Technics, Engineer at the Metal Forming Department. E-mail: yaros-lav.erisov@mail.ru

сокопроизводительные станы горячей и холодной прокатки практически без их доработки.

ПРОКАТКА ПО АКВ-МЕТОДУ

На рис. 1 представлена схема прокатки по ARB-методу. Два листа с очищенной и обезжиренной поверхностью складываются пакетом, который после предварительного нагрева (до температур ниже температур рекристаллизации) прокатывается с разовым обжатием не менее 50% для обеспечения соединение (сваривания) отдельных слоев. Затем полученная полоса, состоящая из двух сваренных слоев, режется на две части, соединяемые стороны которых очищают, складывают в пакет, нагревают и снова прокатывают. Процесс повторяют вплоть до достижения заданного числа циклов прокатки.



Рис. 1. Схема прокатки по ARB-методу

При прокатке по ARB-методу с равными обжатиями за каждый цикл толщину t_n отдельного слоя после n циклов можно рассчитать по формуле [9]:

$$t_n = t_0 \mu^n$$
,

где t_0 – исходная толщина отдельного слоя; $\mu = t_{\kappa}/t_{\mu}$ – коэффициент обжатия пакета за цикл; t_{μ} и t_{κ} – толщина пакета до и после прокатки соответственно.

При этом суммарное относительное обжатие \mathcal{E}_n отдельного слоя за n циклов составит:

$$\varepsilon_n = 1 - \frac{t_n}{t_0} = 1 - \mu^n$$

Тогда, используя выражение для интенсивности деформаций [10] с учетом плоского деформированного состояния при прокатке и условия несжимаемости, получим формулу для определения накопленной интенсивности деформаций за *n* циклов:

$$e_n = -\frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{t_n}{t_0} = \frac{2}{\sqrt{3}} n \ln \frac{1}{\mu},$$

Таким образом, при прокатке пакета, составленного из двух полос исходной толщиной $t_0 = 0,5$ мм (начальная толщина пакета $t_H = 1$ мм), с обжатием 50% за цикл (конечная толщина пакета $t_{\kappa} = 0,5$ мм, коэффициент обжатия $\mu = 0,5$) после 5 циклов толщина отдельного слоя составит $t_5 = 1/64$ мм = 15,625 мкм, суммарное обжатие – $\varepsilon_5 = 96,875\%$ и накопленная деформация – $e_5 = 4$. В случае 10 циклов прокатки по ARB-методу толщина отдельного слоя составит $t_{10} = 1/2048$ мм = 0,488 мкм, суммарное обжатие – $\varepsilon_{10} = 99,902\%$ и накопленная деформация – $e_{10} = 8$ и т.д. (рис. 2).



Рис. 2. Зависимость толщины отдельного слоя t_n , суммарного обжатия \mathcal{E}_n и накопленной интенсивности деформаций e_n от числа циклов n прокатки по ARB-методу ($t_0 = 0,5$ мм, $\mu = 0,5$)

Как видно из приведенных расчетов (рис. 2) при прокатке по ARB-методу могут быть достигнуты высокие значения деформаций (> 6-8), что является непременным условием формирования сильно фрагментированной и разориентированной (ультрамелкозернистой) структуры [11].

При этом можно подобрать такое количество слоев пакета и величину его обжатия за цикл (например, 2 слоя – обжатие 50%, 3 слоя – обжатие 66,7% и т.д.), при которых прокатка по ARB-методу может проводиться практически неограниченное число циклов. Однако, на практике с увеличением числа циклов длина и ширина полосы будут постоянно уменьшаться из-за необходимости проводить обрезку растрескавшихся кромок.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование проводилось на литейном алюминиевом сплаве системы Al-Mg – AMr10, повышенной коррозионной стойкости. Химический состав сплава приведен в табл. 1. Необходимо отметить, что относительно высокое содержание магния в сплаве способствует улучшению свариваемости отдельных слоев в процессе прокатки по ARB-методу.



Таблица 1. Химический состав сплава АМг10 по ГОСТ 1583-93 (в %) [12]

Рис. 3. Схема эксперимента

На рис. З приведено описание последовательности операций. На первом этапе образцы размером 100х100х7 мм отливались в специально изготовленной оснастке по методу жидкостного прессования [4] с одновременным акустическим воздействием от слабых импульсных токов частотой 500 кГц [13], который уже на стадии литья обеспечивает мелкозернистую структуру со средним размером зерен около 50-70 мкм (рис. 4, а). Затем поверхность отливок механически обрабатывалась с целью удаления загрязнений (толщина после фрезерования составила 6,2 мм).

Подготовленные образцы (100х30х6,2 мм) прокатывались за несколько проходов на лабораторном прокатном стане К220/75-300 (рис. 4) со скоростью 1,5 м/мин на конечную толщину 0,51 мм. Режимы прокатки приведены в табл. 2. Перед отжигом (270-300°°С, 1,5-2 часа) производилась обрезка кромки прокатанной ленты с целью удаления трещин. Отжиг и нагрев проводились в печи сопротивления МП-2У.

Затем лента разрезалась на полосы (100x25x0,51 мм), поверхность которых очищалась от окисной пленки металлической щеткой и обезжиривалась ацетоном. После этого формировался пакет из двух слоев, который после предварительного нагрева (150-170°°С) прокатывался с обжатием 50%. Выполнено 10 циклов прокатки по ARB-методу, обжатия и деформации приведены в табл. 2.

Технические характеристики



Рис. 4. Лабораторный прокатный стан К220/75-300

Nº	Операция	Проход, мм	Относительно обжатие <i>Е</i> , %		Интенсивность деформаций е	
			Разовое	Суммарное	Разовая	Суммарная
0	Отливка	6,2	-	-	-	-
1	Холодная прокатка (6 проходов)	$6,2 \rightarrow 5,35$	13,7%	13,7%	0,17	0,17
2		$5,35 \rightarrow 4,48$	16,6%	27,7%	0,21	0,37
3		$4,48 \rightarrow 3,58$	20,1%	42,2%	0,25	0,64
4		$3,58 \rightarrow 2,49$	30,4%	59,8%	0,42	1,05
5		$2,49 \rightarrow 1,51$	39,4%	75,6%	0,58	1,63
6		1,51 → 0,51	66,2%	91,8%	1,26	2,89
7	Отжиг	-	-	-	-	-
8	Прокатка по ARB-методу (10 циклов)	1,0 → 0,5	50%	95,97%	0,80	3,71
9				97,98%		4,50
10				98,99%		5,31
11				99,50%		6,11
12				99,75%		6,91
13				99,87%		7,71
14				99,94%		8,51
15				99,97%		9,31
16				99,98%		10,12
17				99,99%		10,91

Таблица 2. Режимы прокатки образцов

Металлографические исследования литых образцов проводились на металлографическом микроскопе МИМ-8м при общем увеличении 200 крат. Исследование изменения микроструктуры в процессе прокатки проводилось на просвечивающем электронном микроскопе ЭМВ-100Б при ускоряющем напряжении 75 кВ с увеличением до 30'000 крат. Образцы для анализа предварительно шлифовались, полировались и электрополировались на стандартном оборудовании.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изменение микроструктуры алюминиевого сплава АМг10 в процессе холодной прокатки приведено на рис. 5. Структура литого образца характеризуется равномерным распределением фазы Al_3Mg_2 в матрице α -твердого раствора (рис. 5, а). Как уже было отмечено величина зерна составляет 50-70 мкм.

После холодной прокатки с суммарным относительным обжатием 91,8% наблюдается сильное дробление фазы Al_3Mg_2 и высокая плотность линий скольжения, проходящих в направлении прокатки (рис. 5, б). В целом размеры структурных блоков составляют порядка 2-3 мкм.

Структура после прокатки по ARB-методу (суммарное относительное обжатие 99,99%) представляется блочной с высокой плотностью дислокаций на границах блоков, т.е. наблюдается так называемая дислокационная ячеистая структура (рис. 5, в). Размер блоков составляет примерно 200-500 нм.



Рис. 5. Структура сплава АМг10 после кристаллизации (а), холодной прокатки (б) и прокатки по ARB-методу (в)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из приведенных результатов исследований видно, что при прокатке алюминиевого сплава AMr10 по ARB-методу формируется сильно фрагментированная ультрамелкозернистая структура с размером блоков около 200-500 нм. При этом для обеспечения достигнутого результата необходимо, чтобы величина накопленной интенсивности деформаций составляла порядка 9-10.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-20013 годы", государственный контракт № 11.519.11.3019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Чернов Д.К. Избранные труды по металлургии и металловедению. М.: Наука, 1983. – 448 с.
- Сверхпрочность ультрамелкозернистых алюминиевых сплавов, полученных интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, Н.А. Еникеев, М.Ю. Мурашкин, С.Е. Александров, Р.В. Гольдитейн // Доклады Академии наук. 2010. Т. 432. №6. С. 757-760.
- 3. Microstructure and mechanical properties of accumulative roll bonded aluminum alloy AA5754 / *T. Hausol, H.W. Hoppel, M. Goken //* Journal of Physics: Conference Series, 2010. Vol. 240. P. 21-28.
- Использование способа литья под поршневым давлением для измельчения структуры алюминиевого

сплава / Ф.В. Гречников, И.П. Попов, А.М. Бибиков, Е.Г. Демьяненко, К.А. Николенко // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. №2 (33). С. 183-191.

- Валиев Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос. 2000. 272 с.
- Severe plastic deformation (SPD) processes for metals /A. Azushima, R. Kopp, A. Korhonen, D.Y. Yang, F. Micari, G.D. Lahoti, P. Groche, J. Yanagimoto, N. Tsuji, A. Rosochowski, A. Yanagida // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2008. Vol. 57. Issue 2. P. 716-735.
- Патент EP 1861211B1, МПК B21J5/00, B21C23/01. Severe plastic deformation of metals / A. Rosochowski; University of Strathclyde.
- Krallics G., Lenard J.G. An examination of the accumulative roll-bonding process // Journal of Materials Processing Technology. 2004. Vol. 152. Issue 2. P. 154-161.
- Kusnierz J., Bogucka J. Accumulative roll-bonding (ARB) of Al99,8% // Archives of metallurgy and materials. 2005. Vol. 50. Issue 1. P. 219-230.
- 10. Соколовский В.В. Теория пластичности. М.: Высш. школа, 1969. 608 с.
- Valiev R.Z. Nanostructuring of metallic materials by SPD processing for advanced properties // International Journal of Materials Research. 2009. Vol. 100(6). P. 757-761.
- ГОСТ 1583-93. Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия. Введ. 1997-01-01. М.: Издательство стандартов, 2003. 28 с.
- Управление структурообразованием и свойствами литых материалов слабым акустическим воздействием / А.М. Бибиков, И.П. Халтурин, В.И. Зарембо // Литейное производство. 2007. №5. С. 12-14.

PRODUCTION OF ALUMINUM ALLOY AMg10 WITH ULTRA-FINE GRAINED MICROSTRUCTURE BY ACCUMULATIVE ROLL-BONDING

© 2013 F.V. Grechnikov, I.P. Popov, Ya.A. Erisov

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

In this article on the case of aluminum alloy AMg10 it is described the production of ultra-fine grained microstructure by accumulative roll-bonding, which consists in rolling the pack of two sheets to 50%. Then, the rolled material is sectioned into two halves, stacked again and the procedure of rolling is repeated again.

Key words: aluminum alloy, AMg10, severe plastic deformation, rolling, accumulative roll-bonding, microstructure, ultra-fine grain.

Гречников Федор Васильевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе. E-mail: gretch@ssau.ru

Попов Игорь Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением.

E-mail: igr_popov@mail.ru

Ерисов Ярослав Александрович, кандидат технических наук, инженер кафедры обработки металлов давлением. E-mail: yaroslav.erisov@mail.ru