

Влияние добавок углеродных нанотрубок и оксидных нановолокон на механические свойства алюминия АД0 после термомеханической обработки

А. В. Алексеев, В. В. Стрекалов, А. А. Хасин, М. Р. Предтеченский

Получены литые алюминиевые композитные материалы на основе алюминия АД0, упрочненные углеродными нанотрубками и нановолокнами оксида алюминия. Показано, что добавки 0,05 масс. % одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) и нановолокон оксида алюминия (НВОА) позволяют увеличить предел прочности литого металла на 15 % и 16 % соответственно. Упрочнение металла сохраняется после холодной деформации и отжига. Алюминий АД0 с добавками ОУНТ или НВОА не теряет высокую прочность после отжига, в то время как алюминий без добавок значительно разупрочняется, это позволяет получать отожженную алюминиевую проволоку, с пределом прочности на 54 – 69 % и пределом текучести на 53 – 78 % большим, чем у металла без добавок. Изучено влияние ОУНТ и НВОА на размер зерна алюминия АД0 в литом состоянии, после холодной деформации и отжига. Обнаружено, что нанодобавки сдерживают рост зерна металла на стадии собирательной рекристаллизации, а также оказывают влияние на протекание процесса первичной рекристаллизации алюминия.

Ключевые слова: алюминий, углеродные нанотрубки, литые композиты, микроструктура, рекристаллизация, холодная прокатка, отжиг.

DOI: 10.30791/1028-978X-2021-4-56-66

Введение

Более 10 лет идут исследовательские работы по влиянию углеродных нанотрубок (УНТ) на механические свойства алюминия и его сплавов. Показано, что добавки УНТ позволяют увеличить предел прочности алюминия до 300 % [1 – 4], предел текучести до 120 % [3 – 7], твердость до 130 % [3, 4, 7] при этом пластичность алюминия, как правило, уменьшается, но есть отдельные работы, где удалось добиться одновременного увеличения прочности и пластичности алюминия на 300 % и 10 % соответственно [8]. Следует отметить, что в подавляющем большинстве работ для изготовления материала используют методы порошковой металлургии, в то время как упрочнение литого алюминия представлено в литературе недостаточно. Имеются работы, в которых рассмотрено влияние добавок УНТ на механические свойства

сплавов после термообработки, так в работе [9] изучено влияние многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) на твердость сплава Д16 после закалки и старения. Показано, что упрочнение металла сохраняется после термообработки.

Еще одним перспективным упрочняющим материалом для алюминиевых сплавов является оксид алюминия. Его вводят в металлическую матрицу в виде наночастиц [10] и микропорошков [11], а также макроволокон [12]. Для получения композитов используют как методы порошковой металлургии, так и литейную технологию. При этом добавки наночастиц Al_2O_3 в количестве 2 – 5 масс. % позволяют увеличить предел текучести и предел прочности алюминиевых сплавов до 84 % [13] и 59 % [10, 14] соответственно.

Исследования по влиянию термической или термомеханической обработки на свойства литого технического алюминия с добавками УНТ и нано-

волокон Al_2O_3 в открытой литературе отсутствуют. Тем не менее, технический алюминий в отожженном и нагартованном состоянии используют в электротехнике для изготовления проводов (в том числе для линий электропередач) и шин, которые могут находиться под механической нагрузкой.

Недавно в нашей стране вновь возобновилось использование алюминиевой электропроводки для жилых и нежилых зданий. В качестве материала для нее, согласно ГОСТ Р58019, применяют сплавы 8030 и 8176, их достоинством является повышенная пластичность и одновременная высокая прочность. Недостатком является то, что они имеют большее сопротивление, чем технический алюминий.

Тем не менее, изготовление электропроводки из технического алюминия прекращено, поскольку он имеет низкую прочность и для достижения требуемого уровня упрочнения используется в нагартованном состоянии, в результате такие провода имеют плохую пластичность и, следовательно, недостаточную стойкость к перегибам. Для увеличения пластичности проводов из технического алюминия их можно отжечь, но это приведет к падению прочности ниже допустимого уровня и сделает их непригодными для применения в электропроводке. Поэтому получение материалов на основе технического алюминия, которые способны сохранять прочность после отжига, является актуальной задачей.

Цель работы — исследование влияния нагартовки и отжига на механические свойства технического алюминия марки АД0, упрочненного добавками УНТ и оксидных нановолокон в количестве 0,05 масс. %.

Экспериментальная часть

Для изготовления алюминиевых проволок использовали технический алюминий АД0. В качестве упрочняющих добавок применяли одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) производства OCSiAl в оксидном покрытии, а также нановолокна оксида алюминия (НВОА), представленные компанией OCSiAl.

ОУНТ получены промышленным методом каталитического осаждения в газовой фазе с использованием железо-содержащего катализатора. Нанотрубки дополнительно очищали от примесей катализатора с помощью обработки в азотной кислоте при 70 °С в течение 7 ч и далее отмывали в дистиллированной воде, после чего содержание железа составило менее 1 масс. %. Покрытие на-

нотрубок оксидом кремния было выполнено методом гидролиза тетраэтоксисилана на поверхности пучков ОУНТ. Диаметр пучков ОУНТ составлял ~ 10 – 30 нм, длина — более 5 мкм. Толщина оксидного покрытия находилась в диапазоне 10 – 20 нм. Концентрацию добавки ОУНТ в алюминии рассчитывали исходя из массы УНТ в оксидном покрытии.

НВОА получены оригинальным методом жидкофазного каталитического окисления расплава алюминия воздухом при температуре 820 °С. В качестве катализатора использовали расплав оксида теллура, распределенный на поверхности зеркала расплава алюминия. Диаметр НВОА составлял 8 – 15 нм, длина — более 1 мкм.

Изображения углеродных нанотрубок в покрытии и нановолокон оксида алюминия, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEOL JEM-2010, приведены на рис. 1.

Алюминий плавил в индукционной печи, для предотвращения окисления металла на зеркало расплава подавали аргон. Нанодобавки вводили в расплав в количестве 0,05 масс. % в виде однопроцентной лигатуры, состоящей из алюминия технической чистоты и ОУНТ или НВОА, распределенных в нем. После введения лигатуры при температуре 800 °С, расплав перемешивали, охлаждали до 700 °С и разливали в формы из шамотного кирпича. Из литого металла вырезали заготовки для изготовления проволоки. Проволоку получали с помощью прокатки литых заготовок на вальцах с ручьями. Холодную прокатку проводили в одном направлении последовательно на ручьях квадратного сечения со стороной квадрата $3,88 \pm 0,6$ мм. Проволоку нарезали на отрезки одинаковой длины, часть из них испытывали на растяжение в нагартованном состоянии, а часть — после отжига. Отжиг проводили в среде аргона при температуре 350 °С; время выдержки проволоки при температуре отжига составляло 2 ч.

Помимо прокатки проволоки из литого металла прокатывали образцы большего сечения с различной степенью деформации для определения влияния УНТ на размер зерна деформированного и отожженного алюминия. Параметры прокатки проволоки и образцов большего сечения приведены в табл. 1.

Для испытания на растяжение из литого металла вырезали плоские образцы (тип 23 ГОСТ 1497-84), а также образцы для исследования структуры с помощью оптической металлографии (цилиндрические, площадью сечения 1,5 см²).

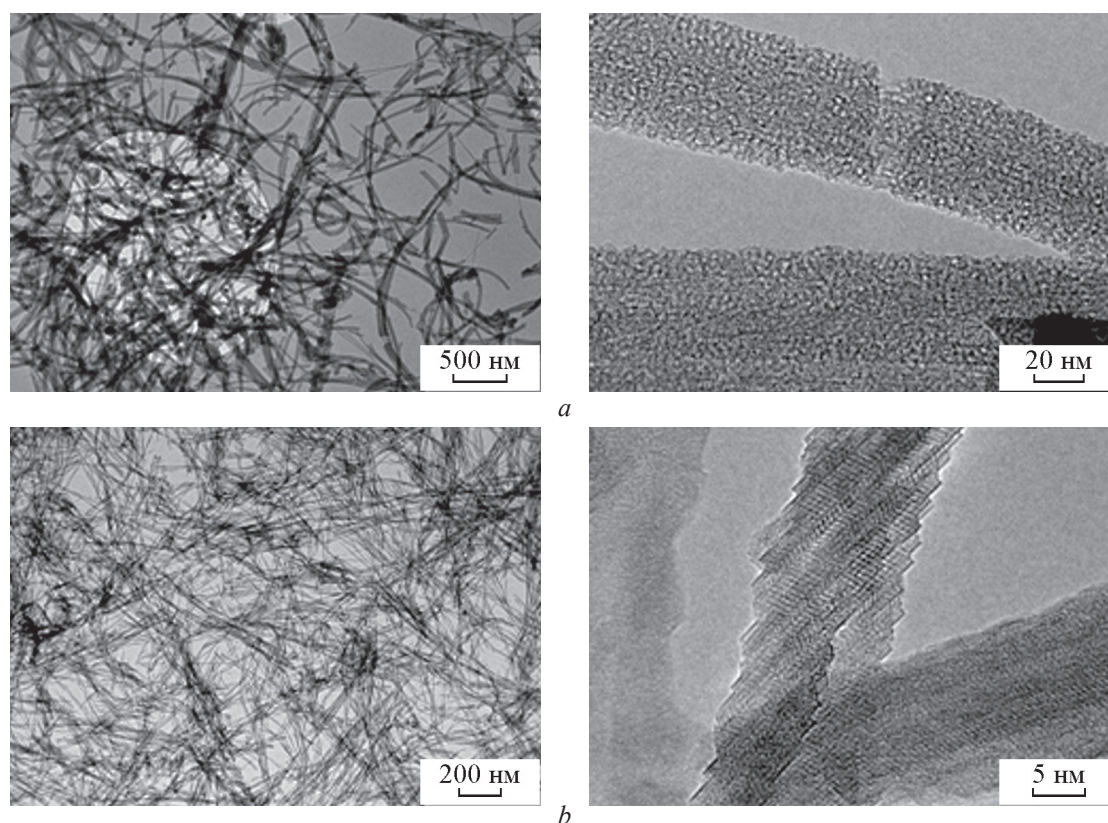


Рис. 1. ПЭМ изображения: *a* — углеродные нанотрубки в оксидном покрытии, *b* — нановолокна оксида алюминия.
Fig. 1. TEM images: *a* — carbon nanotubes with oxide coating; *b* — aluminum oxide nanofibers.

Растяжение литых алюминиевых образцов и проволоки проводили при комнатной температуре на испытательной машине Shimadzu Trapezium X. Для получения значений прочности для каждо-

го типа материала испытывали по 3 – 4 образца. Металлографический анализ выполняли с помощью микроскопа AltamiMet согласно ГОСТ 5639-82 (метода подсчета зерен).

Таблица 1

Режимы прокатки

Table 1

Cold rolling conditions

Образец	Содержание нано-фазы в литом металле, масс. %	Площадь сечения заготовки, мм ²	Площадь сечения проволоки, мм ²	Степень деформации, %
Проволока прямоугольного сечения				
АД0(п)	0	17,5	0,8	95
АД0 + ОУНТ	0,05	11,3	0,8	93
АД0 + НВОА	0,05	20,0	0,8	96
Большие образцы для определения размера зерен				
АД0	0	64,0	15,1	77
			4,5	93
АД0 + ОУНТ	0,05	66,4	15,2	77
			4,2	94
АД0 + НВОА	0,05	63,2	15,5	75
			4,6	93

Таблица 2

Результаты испытаний механических свойств и измерения размера зерен литого алюминия АД0

Table 2

Mechanical properties and grain diameter of cast aluminum AD0

Образец	Содержание добавки, масс. %	Предел прочности*, МПа	Предел текучести*, МПа	Относительное равномерное удлинение*, %	Средний диаметр зерен, мм
АД0	0	81,5 ± 4,7	45,2 ± 3,1	11,4 ± 2,6	0,155
АД0 + ОУНТ	0,05	94,1 ± 10,8	63,1 ± 0,5	5,3 ± 6,0	0,127
АД0 + НВОА	0,05	94,7 ± 8,2	48,7 ± 9,9	18,3 ± 2,4	0,139

* — средние значения ± максимальное отклонение от среднего.

Таблица 3

Механические свойства проволоки из алюминия АД0

Table 3

Mechanical properties of aluminum AD0 wire

Образец	Состояние	Содержание в литом металле, масс. %	Предел прочности, МПа*	Предел текучести, МПа*	Относительное равномерное удлинение, %*
АД0	нагартованное	0	129,2 ± 13,5	122,1 ± 13,8	0
	отожженное	0	72,7 ± 9,4	60,1 ± 0,6	2
АД0+ОУНТ	нагартованное	0,05	152,3 ± 18,7	143,7 ± 16,6	0
	отожженное	0,05	122,8 ± 3,0	107,0 ± 7,4	1,5±0,5
АД0+НВОА	нагартованное	0,05	153,2 ± 3,2	143,3 ± 4,8	0
	отожженное	0,05	111,8 ± 5,5	91,9 ± 6,4	1,5±0,5

* — средние значения ± максимальное отклонение от среднего.

Результаты и обсуждение

Испытания на растяжение литого алюминия АД0 показали, что добавки ОУНТ и НВОА позволяют увеличить прочностные свойства металла. Результаты испытаний приведены в табл. 2. Пример диаграмм растяжения литых образцов показан на рис. 2.

Предел прочности композитов алюминия с ОУНТ и с нановолокнами вырос в среднем на 15 % и 16 %; предел текучести — на 40 % и 8 %, соответственно. Увеличение механических свойств алюминия с нанодобавками обусловлено отчасти измельчением зерна литого металла, что подтверждается анализом изображений микро-структуры алюминия (рис. 3), а также влиянием нано-фазы посредством дисперсионного, дислокационного механизмов упрочнения и армирования [15].

В процессе холодной прокатки помимо деформационного упрочнения металла может происходить улучшение распределения нанодобавок в

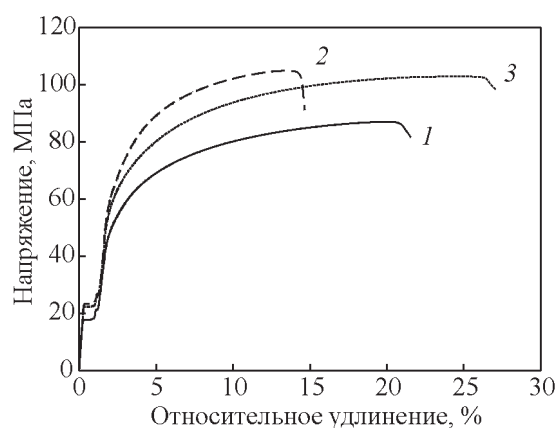


Рис. 2. Диаграммы растяжения образцов литого АД0: 1 — без добавок, 2 — АД0 + ОУНТ, 3 — АД0 + НВОА. Лучшие образцы для каждого типа материала.

Fig. 2. Examples of stress-strain diagrams of cast aluminum AD0: 1 — without additives; 2 — with SWCNT additive; 3 — with AONF additive. Best samples for each type of material.

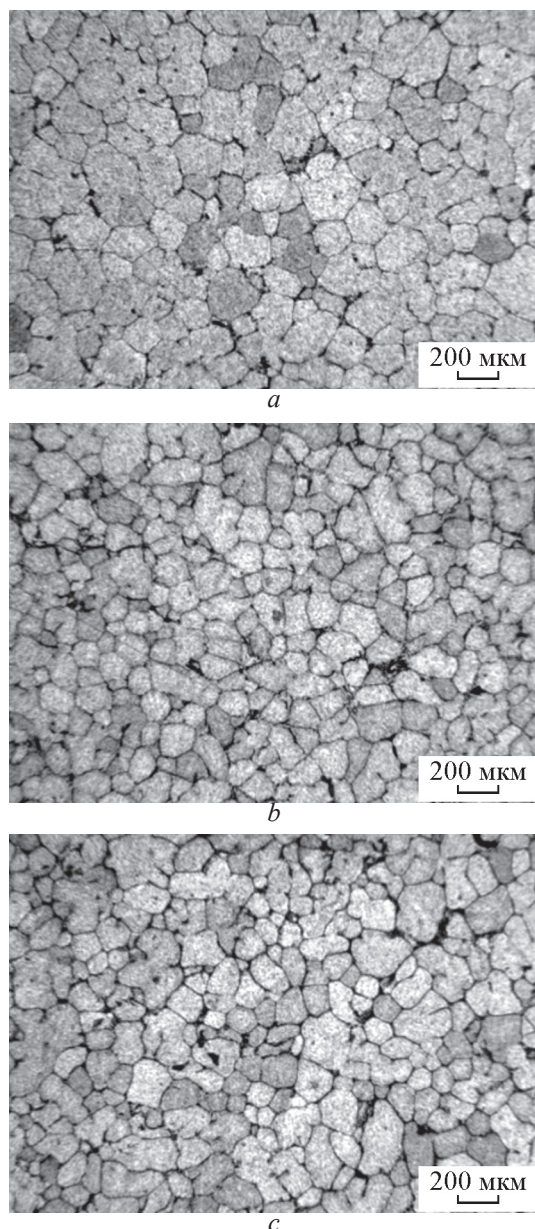


Рис. 3. Микроструктуры литого алюминия АД0: *a* — без добавок; *b* — АД0 + ОУНТ, *c* — АД0 + НВОА.

Fig. 3. Microstructure of cast aluminum AD0: *a* — without additives; *b* — with SWCNT additive; *c* — with AONF additive.

металлической матрице за счет разрушения их агломератов при сдвиговых деформациях. Поскольку агломераты УНТ или оксидных нановолокон сами по себе являются концентраторами напряжений, то их устранение положительно влияет на прочность алюминия, а распределенные в металлической матрице протяженные нано-объекты выступают как препятствия для движения дислокаций. В табл. 3

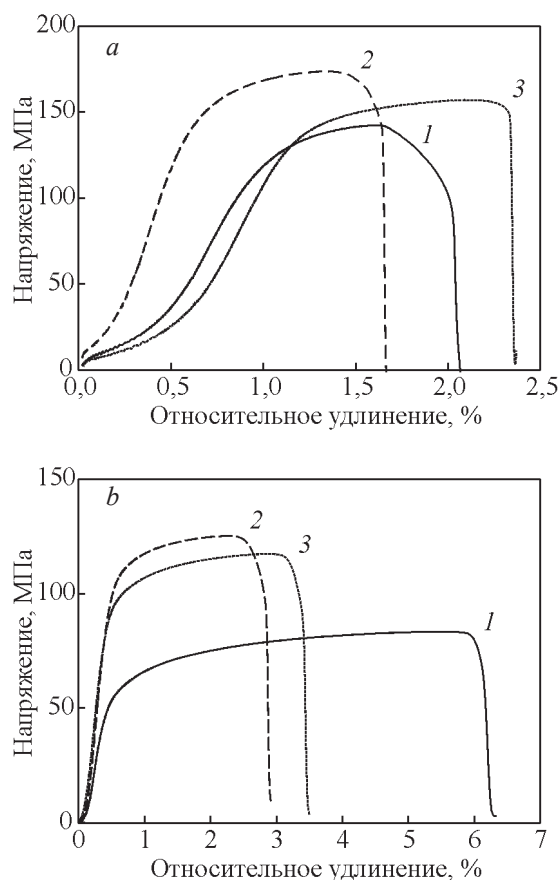


Рис. 4. Диаграммы растяжения холоднокатанной (*a*) и отожженной (*b*) проволоки из АД0: 1 — без добавок; 2 — АД0 + ОУНТ, 3 — АД0 + НВОА. Лучшие образцы для каждого типа материала.

Fig. 4. Examples of stress-strain diagrams of cold-rolled (*a*) and annealed (*b*) aluminum AD0 wire: 1 — without additives; 2 — with SWCNT additive; 3 — with AONF additive. Best samples for each type of material.

приведены значения предела прочности и предела текучести для образцов проволоки после холодной прокатки. На рис. 4 приведены примеры диаграмм растяжения холоднокатанной и отожженной проволоки из АД0.

Увеличение предела прочности холоднокатанных композитов с 0,05 масс. % ОУНТ и НВОА составило 19 % и 18 % соответственно. Если сравнить эти данные с относительным увеличением прочности литого металла, то заметно, что рост предела прочности за счет введения нанодобавок как для литого металла, так и для металла после холодной прокатки примерно одинаков.

Известно, что величина деформационного упрочнения зависит от степени деформации метал-

ла и размера исходного литого зерна [16, с. 144; 17, с. 19]. Степень деформации алюминия в ходе прокатки для всех образцов проволоки была примерно одинакова, а различие в размере зерна для литого металла с добавками и без добавок не превышало 20 % и было обусловлено влиянием нано-фазы на литую структуру алюминия. Следовательно, различие прочности холоднокатанного металла полностью обусловлено влиянием ОУНТ и нановолокон.

Поскольку относительное упрочнение за счет нано добавок холоднокатанного металла совпало с аналогичной величиной для литого металла, можно предположить, что сдвиговых деформаций при холодной прокатке не достаточно, чтобы улучшить распределение нано-фазы в матрице и соответственно увеличить относительное упрочнение за счет влияния нанодобавок.

На рис. 5 сопоставлены значения предела прочности исследованных образцов для литого алюминия, а также для нагартованной и отожженной проволоки со стандартными величинами для сплавов 8030 и 8176 [18].

Условия отжига проволоки были выбраны такими, чтобы обеспечить полное снятие деформационного упрочнения, полученного в ходе холодной прокатки металла [19, с. 19; 20, с. 81]. Видно, что в результате отжига прочность контрольного образца существенно снизилась и стала меньше прочности литого металла. Это свидетельствует о том, что для данных условий отжига произошло полное устранение влияния наклепа. Условия отжига были одинаковы как для контрольных образцов, так и для образцов с добавками. Тем не менее, уменьшение прочности проволоки, содержащей нанодобавки, оказалось гораздо меньше, чем для чистого алюминия.

Такой результат может быть обусловлен несколькими причинами: повышением температуры

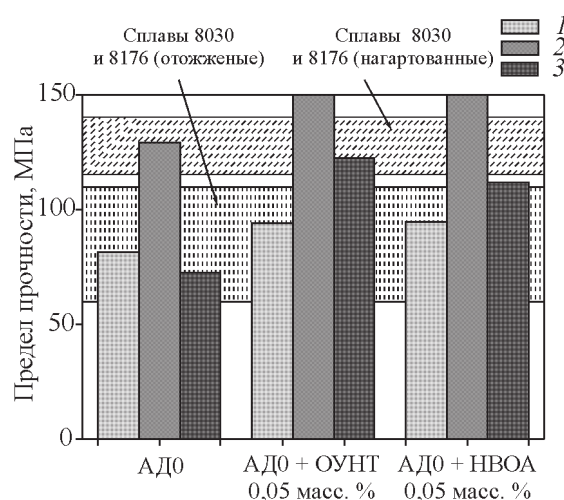


Рис. 5. Прочность образцов АД0 в сравнении с диапазоном значений, установленным ГОСТР58019 для сплавов 8030/8176 в различных состояниях: 1 — литой, 2 — нагартованный, 3 — отожженный.

Fig. 5. Comparison between strength of AD0 reinforced by nanoadditives and strength of 8030/8176 alloys by GOST R58019 in different conditions: 1 — cast, 2 — cold-worked, 3 — annealed.

рекристаллизации металла, за счет закрепления дислокационной структуры дисперсными нанодобавками [21, с. 117]; затруднением движения малоугловых границ нанотрубками и нановолокнами, и тем самым подавлением образования центров первичной рекристаллизации [22, с. 66]; сдерживанием роста зерна металла УНТ и оксидными нановолокнами в ходе собирательной рекристаллизации [22, с. 72].

Для того, чтобы определить, какие процессы имели место при отжиге, исследована микроструктура образцов алюминия АД0 большего сечения после холодной прокатки с различной степенью деформации и в отожженном состоянии (режим от-

Таблица 4

Результаты анализа микроструктуры АД0 после прокатки и отжига

Table 4

Microstructure of cold worked and annealed aluminum AD0				
Степень деформации, %	Состояние	Средний диаметр зерна для образцов, мкм		
		АД0	АД0 + ОУНТ	АД0 + HBOA
0	литой	155	127	139
75 – 77	нагартованный	82,2	65,6	72,7
	отожженный	272	79,1	75,3
93 – 94	нагартованный	44,3	36,5	38,3
	отожженный	55,2	не определяется	36,1

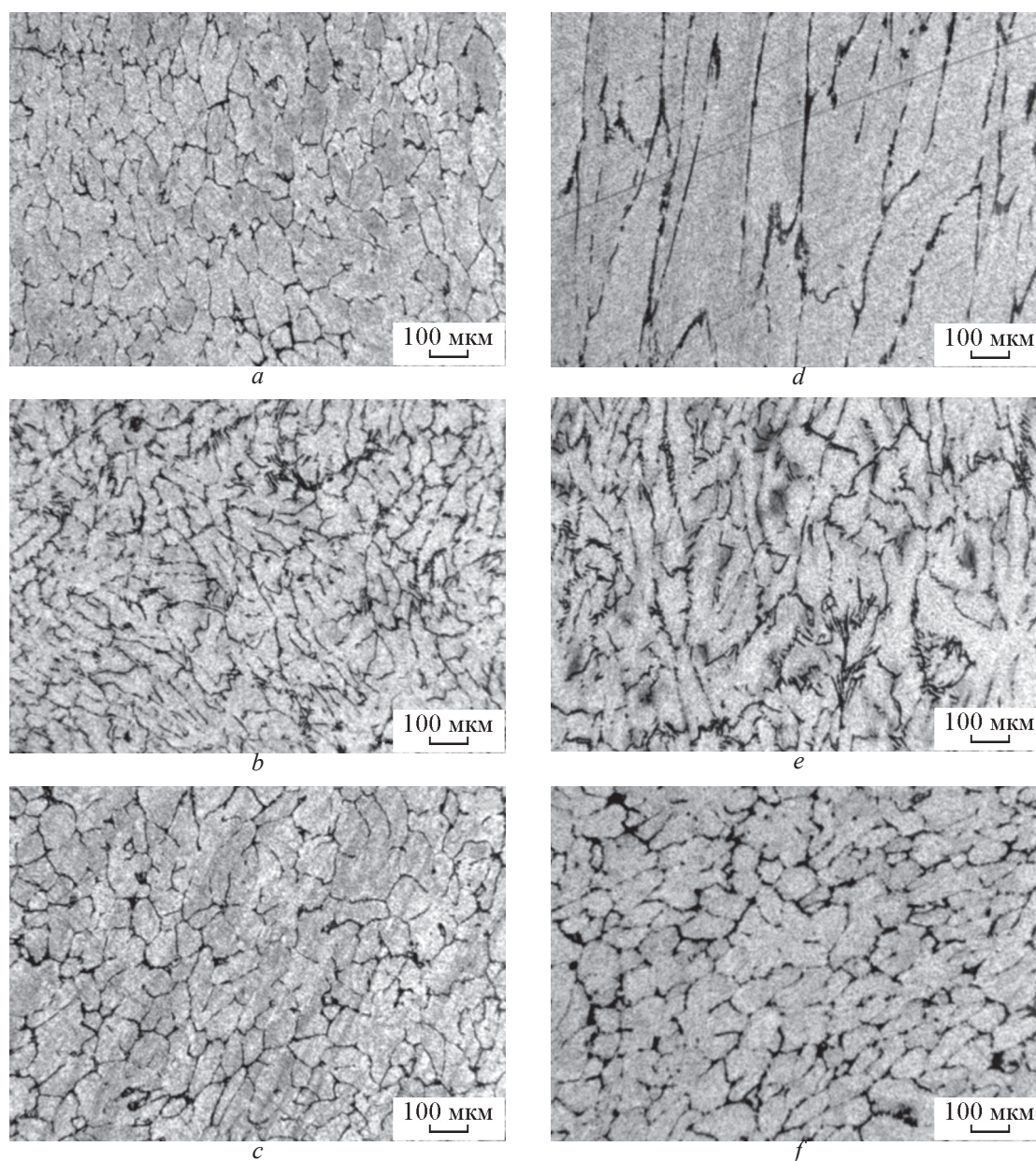


Рис. 6. Микроструктуры больших нагартованных (*a – c*) и отожженных (*d – f*) образцов: *a, d* — АД0; *b, e* — АД0 + ОУНТ; *c, f* — АД0 + НВОА. Степень деформации 75 – 77 %, плоскость шлифа перпендикулярна направлению прокатки.

Fig. 6. Microstructures of aluminum AD0 for big-size cold worked (*a – c*) and annealed (*d – f*) samples: *a, d* — aluminum AD0; *b, e* — aluminum AD0 + SWCNT; *c, f* — aluminum AD0 + AONF. Deformation degree 75 – 77 %; picture plane is perpendicular to rolling direction.

жиг использовали тот же, что и для проволоки). Результаты представлены в табл. 4. Примеры микроструктур приведены на рис. 6.

Из табл. 4 видно, что для степени деформации 75 – 77 % в результате отжига размер зерна контрольных образцов значительно увеличивается и

становится больше, чем у исходного литого металла. Для образцов металла с нанодобавками, также наблюдается увеличение размера зерен на 20 % для алюминия с ОУНТ и на 4 % для алюминия с оксидными нановолокнами. На основании этого можно сказать, что выбранные условия отжига для

данной степени деформации обеспечивают протекание первичной и собирательной рекристаллизации алюминия как для металла без добавок, так и для модифицированного металла [23, с. 144]. Для степени деформации алюминия равной 93 – 94 % также происходил рост зерна для контрольных образцов, при этом размер зерен увеличился на 25 %, в то время как размер зерна алюминия с добавками оксидных нановолокон, наоборот, немного уменьшился.

Таким образом, полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что добавки УНТ и оксидных нановолокон в литой металл способствуют сдерживанию роста зерен в ходе собирательной рекристаллизации при отжиге алюминия для степеней деформации 75 – 94 %.

Для алюминия, деформированного до степени деформации 93 – 94 % (примерно такой же как для холоднокатаной проволоки), в ходе последующего отжига металла наблюдался рост размеров зерен контрольных образцов всего лишь на 25 %, что, очевидно, не может объяснить снижения почти в 2 раза прочностных свойств алюминия (такое уменьшение прочностных свойств было получено при отжиге проволоки без добавок, табл. 3 и рис. 5). Известно, что наибольшее изменение свойств металла происходит на этапе первичной рекристаллизации [22, с. 92].

Таким образом, тот факт, что образцы с добавками сохранили высокую прочность после отжига, обусловлен влиянием УНТ и НВОА на процессы, протекающие на стадии первичной рекристаллизации алюминия. Определение механизма влияния УНТ и НВОА на эти процессы может быть темой отдельного исследования, выходящего за рамки данной работы.

Выводы

С помощью литейной технологии и термомеханической обработки получены материалы на основе алюминия АД0 с добавками одностенных углеродных нанотрубок и нановолокон оксида алюминия.

Показано, что введение 0,05 масс. % нанодобавок приводит к значительному упрочнению образцов. Упрочняющий эффект от нанодобавок сохраняется в ходе холодной деформации металла, а также после отжига. Это позволяет получить отожженную алюминиевую проволоку, с пределом прочности на 54 – 69 % и пределом текучести на 53 – 78 % большим, чем у чистого алюминия за счет добавок ОУНТ или оксидных нановолокон.

Одностенные углеродные нанотрубки и оксидные нановолокна эффективно сдерживают рост зерен алюминия на стадии собирательной рекристаллизации в ходе отжига нагартованного композита. Добавки ОУНТ и НВОА оказывают влияние на протекание первичной рекристаллизации алюминия, что положительно сказывается на прочностных свойствах отожженного металла.

Литература

1. Choi H.J., Shin J.H., Bae D.H. Grain size effect on the strengthening behavior of aluminum-based composites containing multi-walled carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 2011, v. 71, iss. 15, pp. 1699 – 1705.
2. Hansang Kwon, DaeHoon Park, Jean FrancoisSilvain, Akira Kawasaki. Investigation of carbon nanotube reinforced aluminum matrix composite materials. *Composites Science and Technology*, 2010, v. 70, iss. 3, pp. 546 – 550.
3. Se-Il Oh, Jun-Young Lim, Yu-Chan Kim, Juil Yoon, Gyeong-Ho Kim, Joonho Lee, Yun-Mo Sung, Jun-Hyun Han. Fabrication of carbon nanofiber reinforced aluminum alloy nanocomposites by a liquid process. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, v. 542, pp. 111 – 117.
4. Mansoor M., Shahid M. Fractographic evaluation of crack initiation and growth in Al-CNTs nanocomposite fabricated by induction melting. *Actaphysicapolonica A*, 2015, v. 128, iss. 2-B, pp. B276 – B278.
5. Xudong Yang, Chunsheng Shi, Chunnian He, Enzuo Liu, Jiajun Li, Naiqin Zhao. Synthesis of uniformly dispersed carbon nanotube reinforcement in Al powder for preparing reinforced Al composites. *Composites*, 2010, Part A, v. 42, iss. 11, pp. 1833 – 1839.
6. Jin-zhi Liao, Ming-Jen Tan, Idapalapati Sridhar. Spark plasma sintered multi-wall carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites. *Materials & Design*, 2010, v. 31, Supplement 1, pp. S96 – S100.
7. Girisha L., Raji George. Study on properties of multi walled carbon nanotube reinforced aluminum matrix composite through casting technique. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2014, v. 3, iss. 4, pp. 1372 – 1375.
8. Hansang Kwon, DaeHoon Park, Jean Francois Silvain, Akira Kawasaki. Investigation of carbon nanotube reinforced aluminum matrix composite materials. *Composites Science and Technology*, 2010, v. 70, iss. 3, pp. 546 – 550.
9. Pérez-Bustamante R., González-Ibarra M.J., González-CantúJ., Estrada-Guelli, Herrera-RamírezJ.M., Miki-Yoshida M., Martínez-SánchezR. AA2024-CNTs composites by milling process after T6-temper condition. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, v. 536, Supplement 1, pp. S17 – S20.

10. Casati R., Vedani M. Metal matrix composites reinforced by nano-particles — a Review. *Metals*, 2014, v. 4, iss. 1, pp. 65 – 83.
11. Tahamtan S., Halvae A., Emamy M., Zabihi M.S. Fabrication of Al/A206–Al2O3 nano/micro composite by combining ball milling and stir casting technology. *Materials and Design*, 2013, v. 49, pp. 347 – 359.
12. Reeb A., Walter V., Schulze V., Weidenmann K.A. Characterization of a hybrid Al₂O₃–aluminum matrix composite manufactured via composite extrusion. *Journal of Composite Materials*, 2015, v. 50, iss. 8, pp. 1099 – 1108.
13. Xiao-Hui Chen, Hong Yan. Fabrication of nanosized Al₂O₃ reinforced aluminum matrix composites by subtype multifrequency ultrasonic vibration. *Journal of Materials Research*, 2015, v. 30, iss. 14, pp. 2197 – 2209.
14. Pan Ma, Yandong Jia, Prashanth Konda Gokuldoss, Zhishui Yu, Shanglei Yang, Jian Zhao, Chonggui Li. Effect of Al₂O₃ nanoparticles as reinforcement on the tensile behavior of Al-12Si composites. *Metals*, 2017, v. 7, iss. 9, pp. 359 – 370.
15. Алексеев А.В., Дубов Д.Ю., Предтеченский М.Р. Влияние углеродных нанотрубок на механические свойства литого алюминия марки А5. Перспективные материалы, 2017, № 8, с. 40 – 52.
16. Мак Лин Д. Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1965, 432 с.
17. Вакуленко И.А., Большаков В.И. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали. Днепропетровск: Издательство днепропетровского нац. университета. ж.-д. трансп. им. акад. В.Лазаряна, 2007, 191 с.
18. ГОСТ Р58019-2017. Катанка из алюминиевых сплавов марок 8176 и 8030. Технические условия.
19. Белецкий М.В., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология применения). Справочник. Киев: Коминтех, 2005, 365 с.
20. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986, 543 с.
21. Хэтч Дж.Е. Алюминий. Свойства и физическое металловедение. М.: Металлургия, 1989, 424 с.
22. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. М.: Металлургия, 1986, 480 с.
23. Блантер М.Е. Металловедение и термическая обработка. М.: Машгиз, 1963, 416 с.
3. Se-Il Oh, Jun-Young Lim, Yu-Chan Kim, Juil Yoon, Gyeong-Ho Kim, Joonho Lee, Yun-Mo Sung, Jun-Hyun Han. Fabrication of carbon nanofiber reinforced aluminum alloy nanocomposites by a liquid process. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, vol. 542, pp. 111 – 117.
4. Mansoor M., Shahid M. Fractographic evaluation of crack initiation and growth in Al-CNTs nanocomposite fabricated by induction melting. *Acta Physica Polonica A*, 2015, vol. 128, iss. 2-B, pp. B276 – B278.
5. Xudong Yang, Chunsheng Shi, Chunlian He, Enzuo Liu, Jiajun Li, Naiqin Zhao. Synthesis of uniformly dispersed carbon nanotube reinforcement in Al powder for preparing reinforced Al composites. *Composites*, 2010, Part A, vol. 42, iss. 11, pp. 1833 – 1839.
6. Jin-zhi Liao, Ming-Jen Tan, Idapalapati Sridhar. Spark plasma sintered multi-wall carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites. *Materials & Design*, 2010, vol. 31, Supplement 1, pp. S96 – S100.
7. Girisha L., Raji George. Study on properties of multi walled carbon nanotube reinforced aluminum matrix composite through casting technique. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2014, vol. 3, iss. 4, pp. 1372 – 1375.
8. Hansang Kwon, Dae Hoon Park, Jean Francois Silvain, Akira Kawasaki. Investigation of carbon nanotube reinforced aluminum matrix composite materials. *Composites Science and Technology*, 2010, vol. 70, iss. 3, pp. 546 – 550.
9. Pérez-Bustamante R., González-Ibarra M.J., González-Cantú J., Estrada-Guelli, Herrera-Ramírez J.M., Miki-Yoshida M., Martínez-Sánchez R. AA2024–CNTs composites by milling process after T6-temper condition. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, vol. 536, Supplement 1, pp. S17 – S20.
10. Casati R., Vedani M. Metal matrix composites reinforced by nano-particles — a review. *Metals*, 2014, vol. 4, iss. 1, pp. 65 – 83.
11. Tahamtan S., Halvae A., Emamy M., Zabihi M.S. Fabrication of Al/A₂O₆–Al₂O₃ nano/micro composite by combining ball milling and stir casting technology. *Materials and Design*, 2013, vol. 49, pp. 347 – 359.
12. Reeb A., Walter V., Schulze V., Weidenmann K.A. Characterization of a hybrid Al₂O₃–aluminum matrix composite manufactured via composite extrusion. *Journal of Composite Materials*, 2015, vol. 50, iss. 8, pp. 1099 – 1108.
13. Xiao-Hui Chen, Hong Yan. Fabrication of nanosized Al₂O₃ reinforced aluminum matrix composites by subtype multifrequency ultrasonic vibration. *Journal of Materials Research*, 2015, vol. 30, iss. 14, pp. 2197 – 2209.
14. Pan Ma, Yandong Jia, Prashanth Konda Gokuldoss, Zhishui Yu, Shanglei Yang, Jian Zhao, Chonggui Li. Effect of Al₂O₃ nanoparticles as reinforcement on the tensile behavior of Al-12Si composites. *Metals*, vol. 7, iss. 9, pp. 359 – 370.
15. Alekseeva A.V., Dubov D.Yu., Predtechenskiy M.R. Influence of carbon nanotubes on mechanical properties

References

1. Choi H.J., Shin J.H., Bae D.H. Grain size effect on the strengthening behavior of aluminum-based composites containing multi-walled carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 2011, vol. 71, issue 15, pp. 1699 – 1705.
2. Hansang Kwon, Dae Hoon Park, Jean Francois Silvain, Akira Kawasaki. Investigation of carbon nanotube reinforced aluminum matrix composite materials. *Composites Science and Technology*, 2010, vol. 70, iss. 3, pp. 546 – 550.

- of cast aluminum, grade A5. Inorganic Materials: Applied Research, 2018, vol. 8, no. 2, pp. 270 – 278.
16. McLean D. Mechanical properties of metals, 1962, Wiley, 403 p.
 17. Vakulenko I.A., Bolshakov V.I., *Morfologiya struktury i deformatsionnoye uprochneniye staly* [Morphology and deformation strengthening of steel]. Dnepropetrovsk, akademik V. Lazarjan National Univ. Publ., 2007, 19 p.
 18. GOST R58019-2017. *Katanka iz aluminievih splavov marki 8176 i 8030. Tehnicheskije uslovija* [Wire rod from aluminum alloys grades 8176 and 8030. Specifications]. Russian standard.
 19. Beletskij M.V., Krivov G.A. *Aluminivije splavi (sostav, svojstva, tehnologija, premenenie Spravochnik* [Aluminum alloys: compositions, properties, technology, application. Handbook], Kijev, Komintekh Publ., 2005, 365 p.
 20. Guljaev A.P. *Metallovedeniye* [Metal science], Moscow, Metallurgia Publ., 1986, 543 p.
 21. Hatch J.E. Aluminum: Properties and physical metallurgy. Aluminum Association Inc. and ASM International, 1984, 424 p.
 22. Novikov I.I. *Teorija termicheskoy obrabotki metallov* [Theory of thermal treatment of metals], Moscow, Metallurgija Publ., 1986, 480 p.
 23. Blanter M.E. *Metallovedeniye i termicheskaja obrabotka* [Metal science and thermal treatment of metals], Moscow, Mashgiz Publ., 1963, 416 p.

Статья поступила в редакцию — 10.08.2020 г.

после доработки — 25.09.2020 г.

принята к публикации — 28.09.2020 г.

Алексеев Артём Владимирович — OCSiAl Russia (630090, Новосибирск, ул. Инженерная, 24), научный сотрудник, специалист в области композитных материалов на основе металлической матрицы. E-mail: artem.alekseev@ocsial.com.

Стрекалов Виталий Владимирович — OCSiAl Russia (630090, Новосибирск, ул. Инженерная, 24), инженер, специалист в области металлографии и термической обработки металлов. E-mail: strekalov.vv@ocsial.com.

Хасин Александр Александрович — OCSiAl Russia (630090, Новосибирск, ул. Инженерная, 24), доктор химических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, специалист в области химии, катализа и материаловедения. E-mail: khasin.aa@ocsial.com.

Предтеченский Михаил Рудольфович — Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 1), доктор физико-математических наук, академик РАН; OCSiAl Russia (630090, Новосибирск, ул. Инженерная, 24), физик, специалист в области механики, теплофизики, энергетики. E-mail: predtech@ocsial.com.

Effect of carbon nanotubes and oxide nanofibers on mechanical properties of aluminum AD0 after cold working and annealing

A. V. Alekseev, V. V. Strekalov, A. A. Khasin, M. R. Predtechensky

Cast aluminium composite materials based on AD0 aluminium, reinforced with carbon nanotubes and aluminium oxide nanofibers are obtained. It is shown that the additives of 0.05 wt % of single wall carbon nanotubes (SWCNT) and aluminium oxide nanofibers (AONF) allow increasing ultimate tensile strength of cast metal by 15 % and 16 % respectively. Strengthening of the metal is maintained after cold deformation and annealing. Aluminum AD0 with additives SWCNT or AONF retains high strength after annealing, while aluminum without additives is significantly weakened, this allows to obtain annealed aluminum wire, with a strength limit of 54 – 69 % and yield strength of 53 – 78 % higher than that of metal without additives. The influence of SWCNT and AONF on the size of aluminum grain AD0 in the cast state, after cold deformation and annealing has been studied. Nano-additives have been found to inhibit the growth of metal grains at the stage of collective recrystallization, as well as to influence the process of primary recrystallization of aluminum.

Keywords: aluminum, carbon nanotubes, cast composites, recrystallization, microstructure, cold rolling, annealing.

***Alekseev Artjom** — OCSiAl Russia (Novosibirsk, 630090, Injenernaja st., 24) master of physics, research officer, specialist in the field of metal matrix composites. E-mail: artem.alekseev@ocsial.com.*

***Strekalov Vilaly** — OCSiAl Russia (Novosibirsk, 630090, Injenernaja st., 24), engineer, master of nanotechnology and microsystems engineering, specialist in metallographic and thermal treatment of metals. E-mail: strekalov.vv@ocsial.com.*

***Khasin Alexander** — OCSiAl Russia (Novosibirsk, 630090, Injenernaja st., 24), PhD (Chem), assistant professor, leading researcher, specialist in chemistry, catalysis and materials science. E-mail: khasin.aa@ocsial.com.*

***Predtechenskiy Mikhail** — Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Science (Novosibirsk 630090, Lavrent'ev av., 1); OCSiAl Russia (Novosibirsk, 630090, Injenernaja st., 24), professor, academician of RAS, physicist, expert in mechanics, thermal physics and energy. E-mail: predtech@ocsial.com.*