

М.В. Нарыкова, Б.К. Кардашев, А.А. Левин, А.Г. Кадомцев, В.И. Бетехтин, А.И. Лихачев, О.В. Амосова
ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

Повышение прочности путем создания ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры требует исследования стабильности зеренной структуры и механических свойств. Поэтому изучение температурного интервала, обеспечивающего стабильность структурного состояния, упругих и микропластических свойств ультрамелкозернистых металлических материалов, является актуальным. Настоящая работа продолжает исследование [1], посвященное исследованию УМЗ алюминия марки АД1. Для изучения стабильности структуры, упругих и микропластических свойств была проведена серия изотермических отжигов в интервале 50–350°C с шагом 50°C длительностью от 45 минут до 4 часов (для температуры 200°C) в печи SNOL 6.7/1300.

Материалы

Исследование проводилось на техническом алюминии марки АД1 (табл. 1). По режиму механо-термической обработки было сформировано два состояния, обозначаемых далее как СМК-1 (или SMC-1) и СМК-2 (или SMC-2), а также микрокристаллическое МК (или MC), полученное отжигом СМК-1 (табл. 2). Результаты структурных исследований до отжигов приведены в [1]

Таблица 1. Химический состав титана марки АД1

Сплав	Содержание элементов, вес. %, Al-основа							
	Fe	Si	Ti	Zn	Cu	Mg	Mn	примеси
АД1	≤0,3	≤0,3	≤0,15	≤0,1	≤0,05	≤0,05	≤0,025	≤0,05

Для акустических исследований из центральной части круглых стержней-заготовок изготавливались образцы прямоугольного сечения 1.4×2.5 mm² длиной 25 mm. Как и в [1], упругие и микропластические свойства (модуль Юнга E , амплитудно-независимый декремент упругих колебаний δ , напряжение микропластического течения σ и неупругая деформация ϵ_d) изучались резонансным методом составного пьезоэлектрического вибратора

Результаты исследований

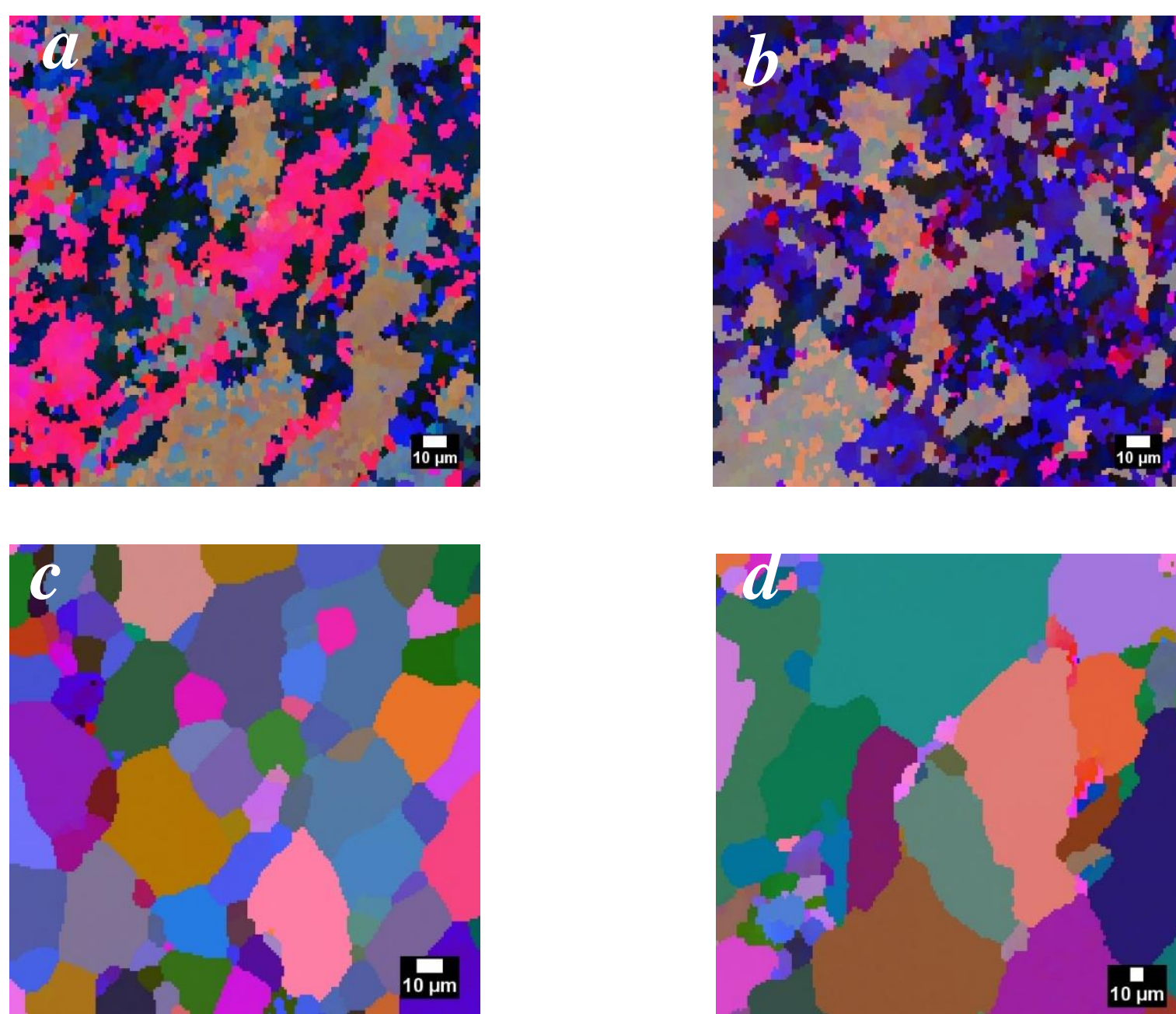


Рис.1. Рис.б. Карты Эйлера для АД1 СМК-1 состояния: а – до отжига, б – отжиг 200°C, с - отжиг 300°C, d - отжиг 350°C.

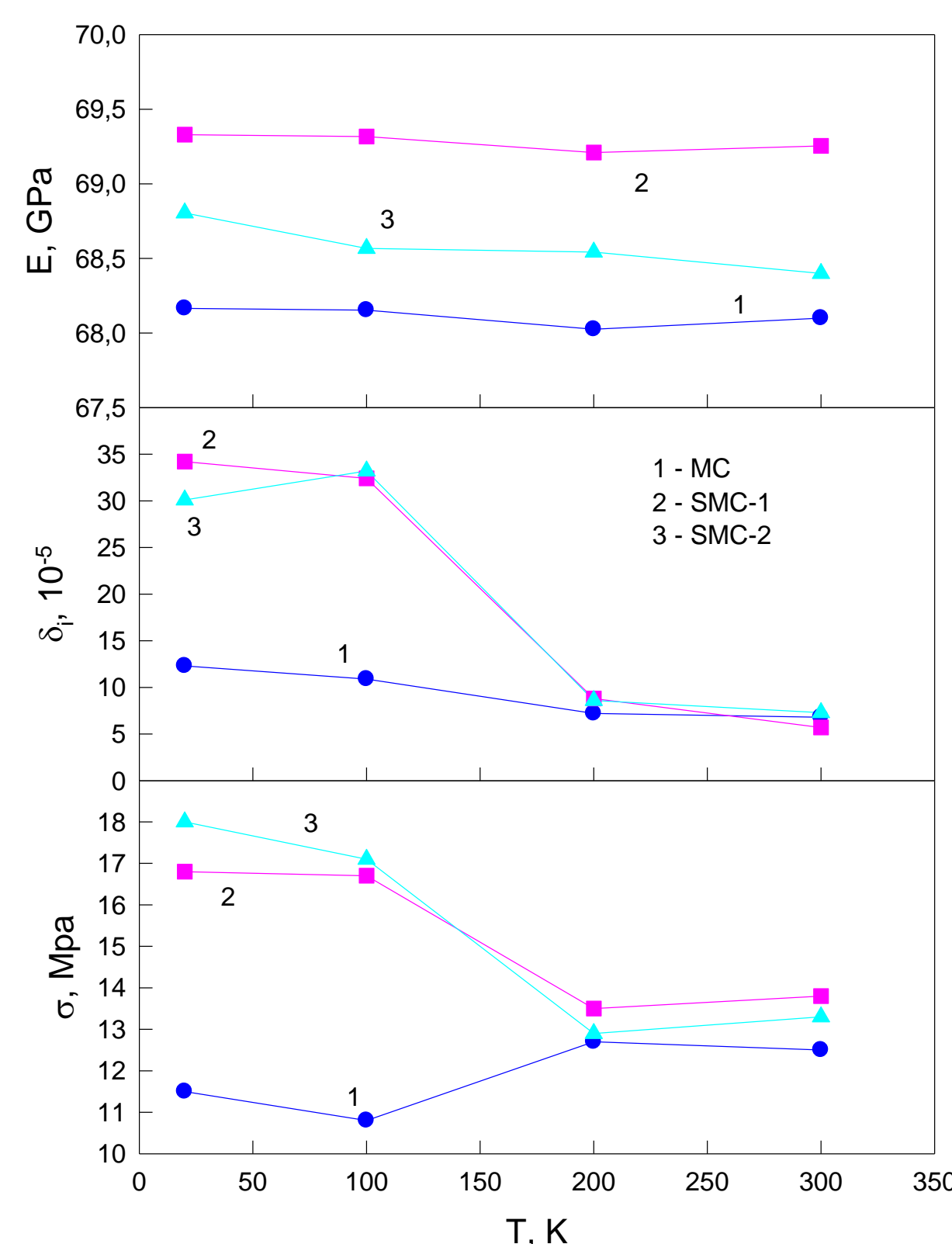


Рис. 2. Влияние температуры отжига T на модуль Юнга E , амплитудно-независимый декремент δ и напряжения микротекутости σ при неупругой деформации $\epsilon_d = 5.0 \times 10^{-8}$ для образцов алюминия АД-1.

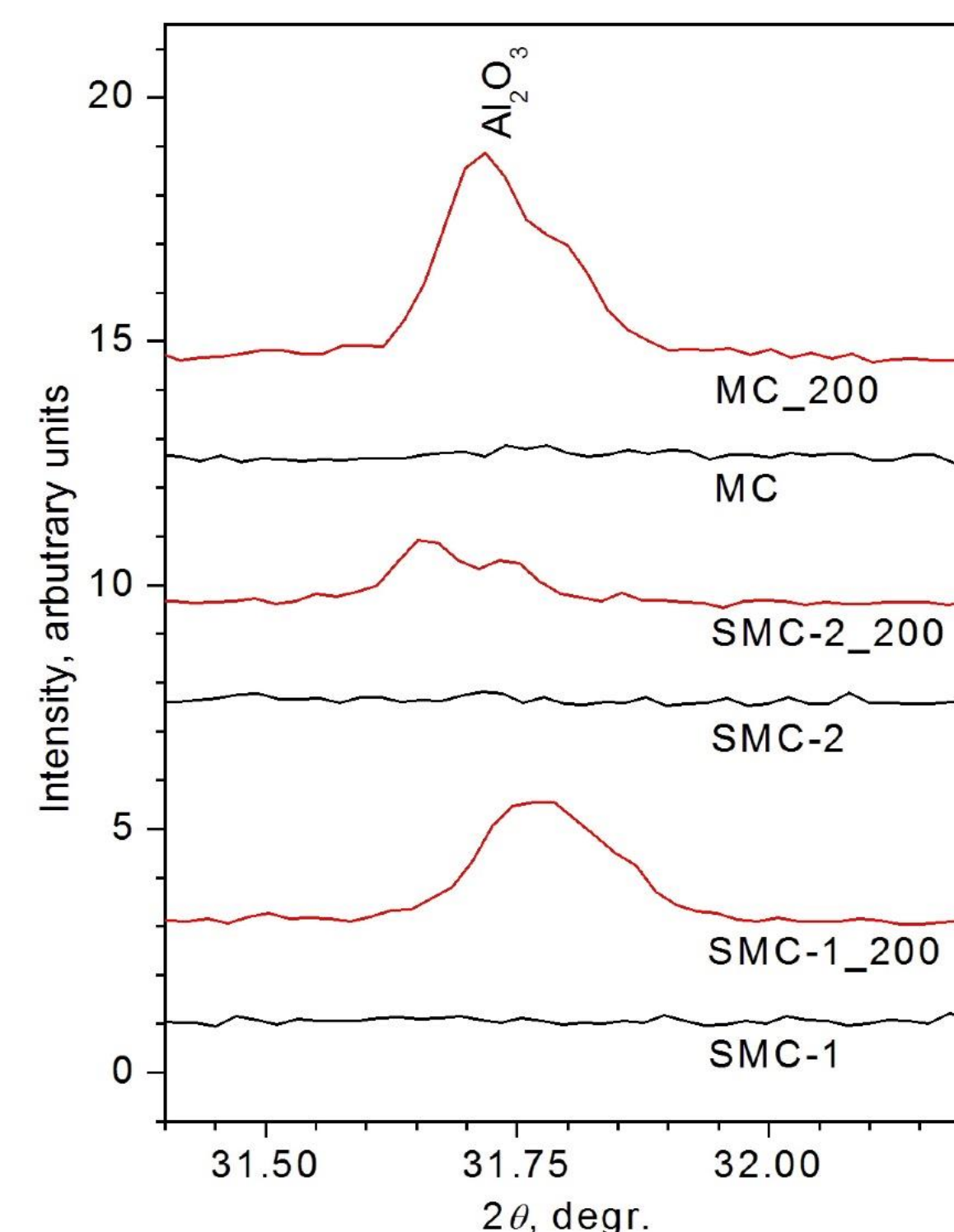


Рис. 3. Часть РД картин измеренных образцов в диапазоне углов дифракции 2θ , внутри которого формируется рефлекс, относимый к одной из модификаций Al_2O_3 . (РД картины сдвинуты вдоль вертикальной оси).

Таблица 2. Структурные состояния АД1. Способ получения.

Состояние	Способ термо-механической обработки
СМК-1 (SMC-1)	Сочетание поперечно-винтовой прокатки с продольной сортовой прокаткой
СМК-2 (SMC-2)	Сочетание поперечно-винтовой прокатки с продольной сортовой прокаткой с применением дополнительного охлаждения в азоте
МК (MC)	Отжиг СМК-1 состояния при $T=250^\circ C$, $t=1$ hour

Таблица 3. Параметр a кубической элементарной ячейки Al материала образцов, средний размер D кристаллитов и микродеформация в них ϵ_s , (температура во время измерений $41 \pm 1^\circ C$).

Образец	a , Å	D , nm	ϵ_s , %
MC	4.05131 ± 0.00030	131.1 ± 8.4	0
SMC-1	4.04933 ± 0.00011	183.8 ± 9.2	0.011 ± 0.003
SMC-2	4.05035 ± 0.00030	194.2 ± 8.4	0
MC (200°C)	4.05035 ± 0.00010	157 ± 17	0
SMC-1 (200°C)	4.04917 ± 0.00007	170 ± 15	0
SMC-2 (200°C)	4.04919 ± 0.00040	216 ± 10	0

После отжига, как следует из рис. 2, значения модуля Юнга меняются мало. Для СМК-1 и МК наблюдается незначительное повышение при 300°C. РД методом установлено формирование оксидов Al_2O_3 на поверхности образцов после отжигов (рис. 3). Оценки показали, что наибольшая весовая доля Al_2O_3 характерна для образца МК (~5.8 wt.%), а значение модуля для этого образца остается наименьшим. Отметим, что при $T=200^\circ C$ выявлено уменьшение параметра решетки (табл. 3), что косвенно может свидетельствовать об увеличении концентрации примесных атомов в объеме зерен при растворении частиц выделений на границах зерен.

В отличие от модуля Юнга, величина декремента δ меняется существенно. Согласно данным табл. 3, после отжига при 200°C наблюдается увеличение размеров кристаллитов (т.е. ОКР – области «идеального кристалла») для всех структурных состояний. По-видимому, количество подвижных дислокаций в кристаллитах становится меньше, что должно приводить к заметному уменьшению декремента.

Заключение

Формирование ультрамелкозернистой структуры в техническом алюминии АД1 привело к заметному изменению упругих и микропластических свойств. Выявлена достаточно высокая термическая стабильность зеренной структуры в СМК-1 и СМК-2 состояниях до температуры 200°C, а модуля упругости – до 300°C. Образующийся при отжиге на воздухе кристаллический Al_2O_3 (до ~5.8 wt.%) не оказывает заметного влияния на величину модуля Юнга E технического алюминия АД. Величина E определяется уровнем внутренних напряжений в Al материале, понижаясь при релаксации микродеформаций в нём.

Благодарности. Авторы благодарят профессора Колобова Ю.Р. за предоставленные образцы АД1. ДОРЭ-исследования выполнены с использованием оборудования федерального ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях»

[1] М.В.Нарыкова, Б.К.Кардашев, В.И.Бетехтин, А.Г.Кадомцев, А.И.Лихачев, О.В.Амосова. Влияние структурного состояния на упругие и микропластические свойства алюминиевого сплава АД1. ФТТ. 2023. т.65. № 8. 2023. С. 1383-1387.