

РАЗДЕЛ 2. МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 669-1

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.011

ПРИМЕНЕНИЕ ЭНТРОПИЙНОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЛИ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ НА ШТАМПУЕМОСТЬ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Екатерина Александровна Носова^{1†}, Александр Петрович Амосов²

¹ Самарский университет, Московское шоссе, 34, 443086, Самара, Россия

² Самарский государственный технический университет, ул. Молодогвардейская, 244, 443100, Самара, Россия

[†] eanosova@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-5490-3235>

² mvm@samgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1994-5672>

Аннотация. Проведён анализ микроструктуры технического алюминия марки АД0 и алюминиевых сплавов АМг2, АМг5, АМг6, АМг10 в отожжённом состоянии: размер зерна и его неоднородность, фазовый состав, кристаллографическая текстура. Предложен метод оценки доли, вносимой различными элементами структуры, на структурную энтропию. С помощью диаграмм Парето выявлены факторы, оказывающие наибольшее влияние на структурную энтропию. Установлено, что доля кристаллографической текстуры вносит наибольший вклад в общую структурную энтропию сплава, а размер зерна - наименьшую. В свою очередь, химический состав оказывает влияние на все показатели структуры, включая фазовый состав, размер зерна, кристаллографическую текстуру. По мере увеличения содержания легирующих элементов доля кристаллографической текстуры в суммарной структурной энтропии уменьшается, но не оказывается ниже 50% в сплаве с максимальным содержанием магния АМг10. Показатели штампуемости сплавов с ростом содержания легирующих элементов ведут себя по-разному: предельный коэффициент вытяжки изменяется незначительно, как и структурная энтропия, вносимая кристаллографической текстурой. Минимальный радиус гибки повышается, также, как энтропия смешивания и фазового состава. Тем самым, отдельные элементы структуры оказывают различное влияние на технологические свойства листовых алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, отожжённое состояние, размер зерна, энтропия смешивания, структурная энтропия, кристаллографическая текстура, текстурная энтропия, предельный коэффициент вытяжки, минимальный радиус гибки, диаграммы Парето.

Для цитирования: Носова Е.А., Амосов А.П. Применение энтропийного подхода для оценки доли влияния структурных особенностей на штампуемость алюминиевых сплавов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19. № 1. С. 93–105. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.011.

Original article

APPLYING OF ENTROPY APPROACH FOR ESTIMATION OF STRUCTURAL FEATURES QUANTATIVE EFFECT ON STAMP ABILITY OF ALUMINUM ALLOYS**Ekaterina A. Nosova^{1†}, Alexander P. Amosov²**¹ Samara University, Moskovskoye shosse, 34, Samara, 443086, Russia² Samara State Technical University, Samara, 244, Molodogvardeyskaya Str., Samara, 443100, Russia[†] eanosova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5490-3235>² mvm@samgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1994-5672>

Abstract. Analysis of commercial aluminum and aluminum alloys Al-2Mg mass%, Al-5Mg mass% Al-6Mg mass%, Al-10Mg mass% microstructure in annealed state is provided: grain size and its unevenness, phase composition, crystallographic texture. Method is proposed for estimation of the part which different structure features involve into the common structural entropy. The most important structural factors for the structural entropy are found via Pareto diagrams. Crystallographic texture involves the greatest effect on the common structural entropy of the alloys, but the grain size has the minimal effect. In terms, chemical composition effects on all structural features: phase composition, grain size, and crystallographic texture. While alloying element quantity and content increases, part of crystallographic texture in common structural entropy decreases, but the minimal value does not become less than 50% in the alloy with maximum Mg content 10 mass.%. The alloys' indexes of stamp ability change differently with increasing of alloying elements content^ limited stretching coefficient changes lightly also structural entropy form crystallographic texture. Minimal bending radius rises like mixing entropy and phase composition entropy. Therefore, every structural feature play the different role in technology properties of sheet aluminum alloys.

Keywords: aluminum alloys, annealed state, grain size, mixing entropy, structural entropy, crystallographic texture, textural entropy, limited stretching coefficient, minimal bending radius, Pareto diagram.

For citation: Nosova, E. A. & Amosova, A. P. (2022). Applying of entropy approach for estimation of structural features quantative effect on stamp ability of aluminum alloys. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 1(19), 93–105. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.011.

Введение

Обеспечение высоких требований и свойств в алюминиевых сплавах в настоящее время реализуется за счёт подбора определённого химического состава сплавов [1-3], в том числе получения высокоэнтروпийных составов [4], экономного легирования редкоземельными элементами и модифицирования [2], пластической деформации [5], термической обработки [6], комплексного воздействия перечисленных приёмов [7, 8], а также воздействия на материалы высокоэнергетическими потоками [9, 10]. Выявление эффекта от проводимых мероприятий выполняется с помощью анализа изменения служебных свойств [11], в том числе механических [12], и изменения различных структурных элементов, таких как размер зерна [13-15], трансформации упрочняющих фаз [16-18], кристаллографической текстуры [19, 20]. Для исследования структурных особенностей применяются различные методики и приборы, увеличения в десятки и сотни тысяч крат, оценивает-

ся взаимная связь перечисленных структурных особенностей с твёрдостью, микротвёрдостью, удельным электросопротивлением, пределом прочности, пределом текучести, относительным удлинением [21, 22], коэффициентом трения, коэффициентом износа, скоростью коррозии и прочими [23, 24]. Несмотря на детальное изучение микроструктуры и свойств в целом, в публикациях не раскрывается факт эффективности реализуемых приёмов, т.е. насколько действенным было применение той или иной обработки. Это понятно, т.к. сложно сопоставить между собой влияние структурных элементов, имеющих различную размерность и порядок значений. Например, размер зерна, измеряемый микрометрами или нанометрами сложно сопоставить по влиянию с кристаллографической текстурой, оцениваемой с помощью полюсной плотности определённых кристаллографических ориентировок. Однако многие исследователи обращают своё внимание на структурную энтропию материалов, связывая в основном это слово с получением эквиволяр-

ной, или близкой к ней, концентрации компонентов в сплавах [4, 25-28].

В настоящее время термин энтропии применяется как для технических, материаловедческих, так и для социально-экономических систем для оценки их степени порядка. Для расчёта энтропии применяются формулы [4, 29]:

$$\Delta S = -R \sum_{i=1}^{i=n} X_i \cdot \ln(X_i), \quad (1)$$

$$\text{или } \Delta S = -R \int_{i=1}^{i=n} X_i \cdot \ln(X_i), \quad (2)$$

где n – количество вариаций или типичных представителей системы (например, количество компонентов сплава), X – доля, вносимая типичным представителем системы, в общую энтропию (например, концентрация i -го компонента), $R = 8,31$ Дж/моль·К – универсальная газовая постоянная.

Формула (1) применяется при дискретном распределении долей, формула (2) – при непрерывном распределении. Например, дискретным распределением долей обладает химический и фазовый составы сплавов, кристаллографическая текстура, а непрерывным распределением может обладать размер зерна.

При наличии в структуре сплавов упрочняющих фаз, энтропию можно рассчитать, зная количество каждой фазы, аналогично расчёту, сделанному для концентрации компонентов. Как показывают результаты [4, 30], для сплава определённого химического состава фазовый состав может изменяться, в связи с чем изменяется и уровень структурной энтропии.

Крупнозернистая структура с небольшим количеством зёрен в единице площади или объёма будет обладать меньшим уровнем энтропии, в то время как мелкозернистая структура будет создавать больший уровень энтропии. Касаемо кристаллографической текстуры, то большое число кристаллографических ориентировок в рекристаллизованном металле приводит к большему уровню структурной энтропии, по сравнению с нагартованным, в котором кристаллографические плоскости имеют преимущественную ориентировку и создают более упорядоченную структуру или, по-другому, с низким уровнем энтропии.

Благодаря принципу суперпозиции, энтропия, вносимая различными элементами структуры, будет в сумме составлять общую структурную энтропию.

Для объективной оценки общей структурной энтропии материалов применяются различные методы, такие как калориметрический

или метод обобщённых реологических моделей. В основу этого метода заложено предположение, что структурные преобразования в материалах приводят к изменению распределения внутренних напряжений, которое отражается на кривой растяжения [29].

Выбор алюминиевых сплавов системы Al-Mg в качестве объектов исследования связан с тем, что указанные листовые деформируемые сплавы широко используются для получения деталей и узлов в различных отраслях машиностроения: транспортном машиностроении, судостроении, ракетостроении, автомобилестроении и других [13, 31]. Высокое содержание магния в сплавах приводит к повышению прочности и снижению пластичности, но не однозначно влияет на штампуемость. Например, однофазная структура в техническом алюминии и сплавах AlMg, и AlMg2 приводит к налипанию металла на штамп, что требует применения смазки. При высоком содержании магния 5-6% по массе и более штампуемость снижается из-за присутствия значительного количества упрочняющих частиц.

В предлагаемом исследовании проведена оценка доли структурных особенностей в листах из технического алюминия и сплавов AlMg2, AlMg5, AlMg6, AlMg10 в общей структурной энтропии, выявлено их влияние на свойства материалов на примере штампуемости.

Методика и материалы

При проведении исследований применялись листовые образцы из технического алюминия, а также алюминиевых сплавов АД0, AlMg2, AlMg5, AlMg6, AlMg10, поставляемые по химическому составу согласно ГОСТ 4784 и механическим свойствам согласно ГОСТ 21631. Все сплавы исследовались в отожжённом состоянии. Режимы отжига выбирались на основании традиционных рекомендаций термической обработки [32-34].

Для оценки доли, вносимой различными элементами структуры (химического состава, количества фаз, размера зерна, разнородности, кристаллографической текстуры) в общую структурную энтропию, использовались следующие расчётные формулы, в которых универсальная газовая постоянная R не берётся в расчёт для наглядности и сохранения нулевой размерности долей энтропии. Кроме того, этот коэффициент одинаковый для всех расчётных формул, поэтому его присутствие не отразится

на доле, вносимой каждой структурной особенностью.

Энтропия химического состава:

$\Delta S_{\text{хим.сост}} = \sum (c_z \cdot \ln(c_z))$, где c – атомная концентрация элементов сплава, включая основу (алюминий), z – количество элементов;

Энтропия фазового состава:

$\Delta S_{\text{фаз.сост}} = \sum (f_z \cdot \ln(f_z))$, где f – атомная концентрация фаз, рассчитанная с учётом диаграмм состояния;

Энтропия, вносимая размером зерна:

$\Delta S_{\text{разм.зерна}} = \sum (n_z \cdot \ln(n_z))$, где n – количество зёрен в пределах 1 мм^2 . За основу была выбрана шкала размера зёрен согласно ГОСТ 5692 (зарубежный стандарт – ASTM Test Methods E 112).

Согласно этой методике структура считается упорядоченной, если на 1 мм^2 приходится 1 зерно, в этом случае структура считается крупнозернистой и ей присваивается минимальный балл -3. Процедура расчёта структурной энтропии, вносимой размером зерна, требует нормировки. В таблице 1 показано соответствие балла и размера зерна, структурной энтропии, вносимой разнотернистостью. Зёрненную микроструктуру оценивали на лицевой стороне образцов.

Энтропия, вносимая разнотернистостью, или разнотернистость оценивалась одновременно с проведением оценки зёрненной структуры.

Таблица 1. Значения балла, размера зерна и структурной энтропии от размера зерна

Table 1. Value of the grain number, grain size and structural entropy from grain size

Номер Зерна G	Средняя площадь сечения зерна, мм	Число зерен N на площади 1 мм^2			Средний диаметр зерна, мм	$N \cdot \ln N$	Нормировка
		минимальное	среднее	максимальное			
-3	1	0,75	1	1,5	1	0	0
-2	0,5	1,5	2	3	0,707	1,38	$8,98 \cdot 10^{-7}$
-1	0,25	3	4	6	0,5	5,54	$3,59 \cdot 10^{-6}$
0	0,125	6	8	12	0,353	16,6	$1,08 \cdot 10^{-5}$
1	$6,25 \cdot 10^{-2}$	12	16	24	0,25	44,3	$2,87 \cdot 10^{-5}$
2	$3,12 \cdot 10^{-2}$	24	32	48	0,177	111	$7,18 \cdot 10^{-5}$
3	$1,56 \cdot 10^{-2}$	48	64	96	0,125	266	$1,72 \cdot 10^{-4}$
4	$7,81 \cdot 10^{-3}$	96	128	192	$8,8 \cdot 10^{-2}$	621	$4,02 \cdot 10^{-4}$
5	$3,9 \cdot 10^{-3}$	192	256	384	$6,2 \cdot 10^{-2}$	1419	$9,19 \cdot 10^{-4}$
6	$1,95 \cdot 10^{-3}$	384	512	768	$4,4 \cdot 10^{-2}$	3194	$2,07 \cdot 10^{-3}$
7	$9,8 \cdot 10^{-4}$	768	1024	1536	$3,1 \cdot 10^{-2}$	7098	$4,60 \cdot 10^{-3}$
8	$4,9 \cdot 10^{-4}$	1536	2048	3072	$2,2 \cdot 10^{-2}$	15615	$1,01 \cdot 10^{-2}$
9	$2,44 \cdot 10^{-4}$	3072	4096	6144	$1,5 \cdot 10^{-2}$	34070	$2,21 \cdot 10^{-2}$
10	$1,22 \cdot 10^{-4}$	6144	8192	12288	$1,1 \cdot 10^{-2}$	73820	$4,78 \cdot 10^{-2}$
11	$6,1 \cdot 10^{-5}$	12288	16384	24576	$7,9 \cdot 10^{-3}$	158990	0,103
12	$3 \cdot 10^{-5}$	24576	32768	49152	$5,6 \cdot 10^{-3}$	3406100	0,220
13	$1,5 \cdot 10^{-5}$	49152	65536	98304	$3,9 \cdot 10^{-3}$	7268200	0,471
14	$8 \cdot 10^{-6}$	98304	131072	196608	$2,7 \cdot 10^{-3}$	15444900	1

Сама методика заключалась в анализе не менее 10 полей изображений, для каждого поля оценивался размер зерна одним из методов, рекомендованных стандартом. Далее для полученного массива данных размера зерна определяли максимальную вероятность H , соответствующий этой вероятности размер зерна d и стандартное отклонение B . Разнотернистость определяли по формуле $\Delta S_{\text{разм.зерна}} = \frac{B}{H \cdot d}$, в

этом случае дробь B/d означает относительный разброс значений размера зерна. Чем меньше это значение, тем однороднее структура.

Оценку текстурной энтропии проводили с помощью рентгеноструктурного анализа по изменению полюсной плотности всех регистрируемых пиков. Текстурную энтропию рассчитывали по формуле: $\Delta S_{\text{текст.}} = \sum_{n=1}^{n=m} P \cdot \ln(P)$, где P – относительная полюсная плотность n -й плоско-

сти, m – количество пиков (кристаллографических плоскостей) на дифрактограмме. При наличии информации по кристаллографической текстуре в виде полюсной плотности типов текстуры (Госса, меди, латуни, бестекстурной и др.) для расчёта текстурной энтропии можно применять ту же формулу $\Delta S_{\text{текст.}} = \sum_{n=1}^{n=m} P \cdot \ln(P)$, где P – полюсная плотность типа текстуры, n – количество типов текстур.

Энтропия химического и фазового состава не требует проведения процедуры нормировки, поскольку содержание элементов в сплаве, как и фазовый состав (или количество фаз в сплаве) не превышает 100 % или 1 (единицы). Нормировка необходима для сравнения влияния величин, имеющих различный порядок значений и различные единицы измерения. Показатели энтропии размера зерна и кристаллографической текстуры проходили нормировку, т.е. были отнесены к максимально возможному значению, определяемому согласно данным справочников, норматива или результатов эксперимента.

Для сопоставления полученных расчётных данных с общим уровнем структурной энтропии проводилась оценка структурной энтропии по диаграммам растяжения. Для этого в формулу (2) в качестве аргумента X_i подставляли аппроксимирующую функцию, найденную для кривой растяжения образцов, полученную в координатах $\sigma_i - \varepsilon_i$, где σ_i – истинные напряжения, МПа, ε_i – истинные (логарифмические) деформации.

Для полученной кривой, называемой кривой упрочнения, подбирали функцию вида $\sigma = \sigma_0 + \alpha \cdot \varepsilon^\beta$, т.к. такая аппроксимация даёт более широкие возможности для структурного анализа [29]. Для выполнения условия нормировки структурной энтропии и обеспечения её нулевой размерности, аппроксимированные функции относили к модулю Юнга, как наиболее высоким значениям напряжений, достижимым в металлах. Наиболее подробно методика расчёта структурной энтропии изложена в работах [35, 36].

Построение диаграмм Парето часто используется в экономике для выбора наиболее выгодных условий для получения необходимых результатов. В них заложена закономерность

80/20 или принцип Парето, выявленный в 1897 году итальянским экономистом Парето, согласно которому 20 % усилий дают 80 % результата. В представленном исследовании этот подход позволил выявить факторы структуры, оказывающие наибольшее влияние на структурную энтропию. Для этого анализа в качестве факторов влияния использовались значения структурной энтропии по каждому фактору влияния (химический и фазовый составы, размер зерна и разнотекстурность, кристаллографическая текстура) в нормированном виде.

Оценку штампуемости проводили с помощью показателя предельного коэффициента вытяжки ($K_{\text{ПР}}$) и минимального радиуса гибки (R_{min}).

Результаты и обсуждение

На рис.1 представлены диаграммы влияния структурных особенностей алюминиевых сплавов в порядке убывания уровня энтропии, вносимой этими структурными особенностями, а на рис.2 – круговые диаграммы, построенные по средним значениям структурной энтропии каждой особенности структуры. Из рис.1а видно, что для технически чистого алюминия наибольшее влияние на структуру оказывает энтропия кристаллографической текстуры (текстурная энтропия), разнотекстурность и энтропия смешивания (химического состава). Причём ключевой особенностью структуры, составляющей 80% от весовой доли всех факторов, является кристаллографическая текстура. Очевидно, что незначительное содержание примесей не оказывает существенного влияния на энтропию химического и фазового состава, а крупнотекстурная структура, характерная для чистого алюминия, имеет низкие показатели структурной энтропии.

Легирование алюминия магнием в количестве около 2 % (сплав АМг2) приводит к появлению слагаемых энтропии химического состава, однако энтропия фаз и размера зерна остаётся на очень низком уровне, т.к. содержание магния около 2 % по массе находится в пределах растворимости магния в алюминии, согласно равновесной диаграмме состояния Al-Mg [30].

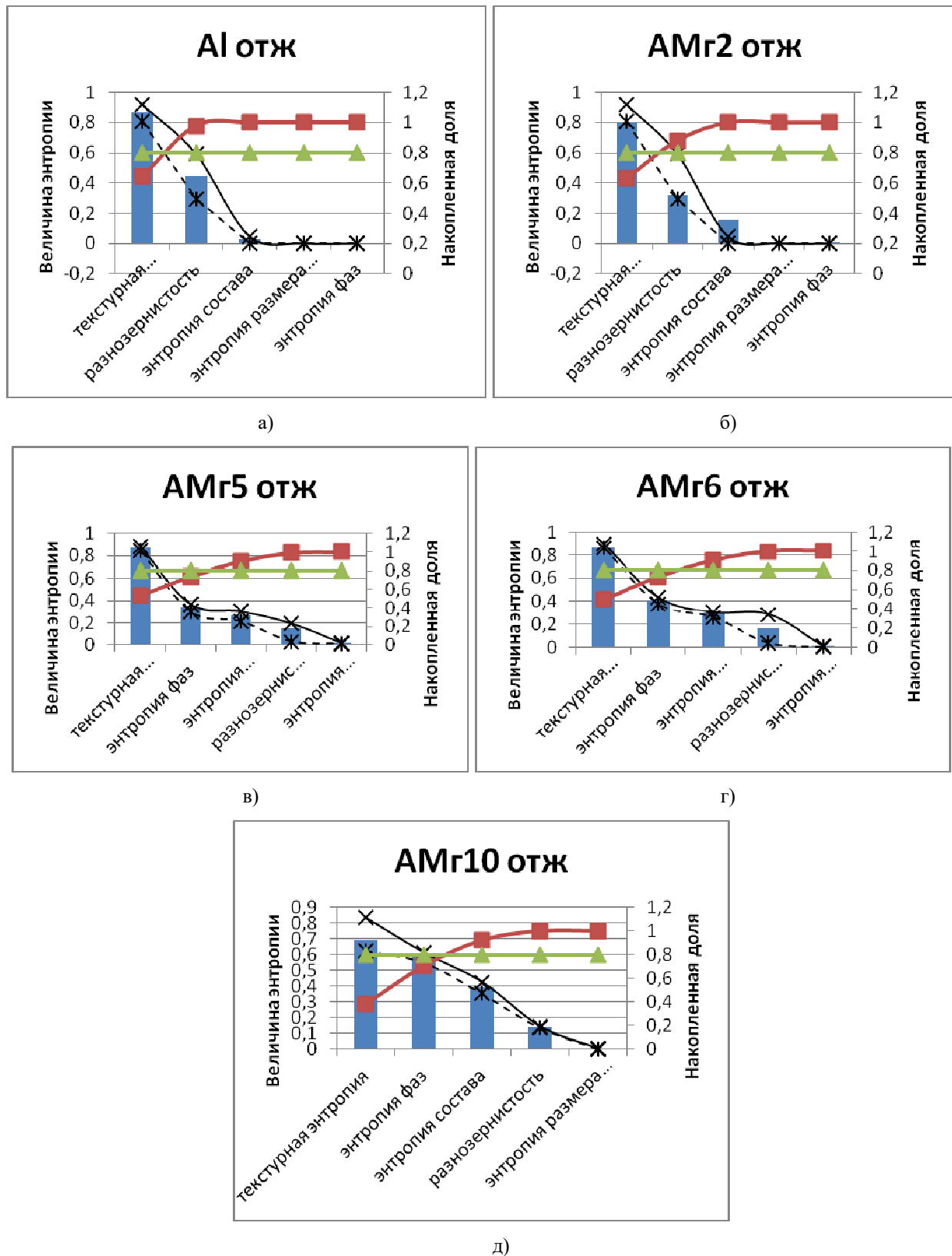


Рис.1. Диаграмма Парето структурной энтропии листов из технического алюминия и алюминиевых сплавов AMg2, AMg5, AMg6 и AMg10

Fig.1. Pareto diagram of structural entropy of commercial aluminum and aluminum alloys Al-2Mg mass %, Al-5Mg mass %, Al-6Mg mass %, Al-10Mg mass %

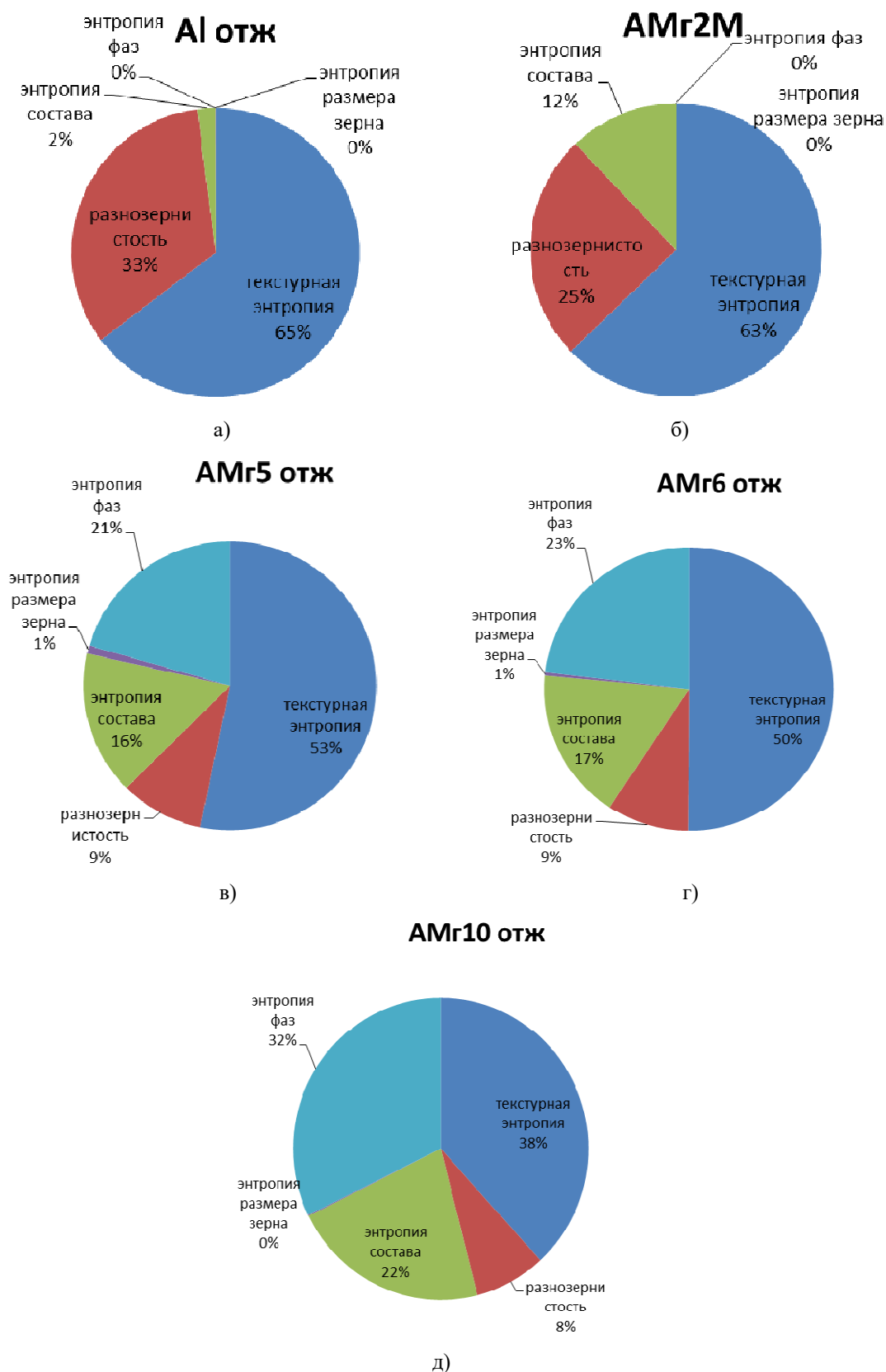
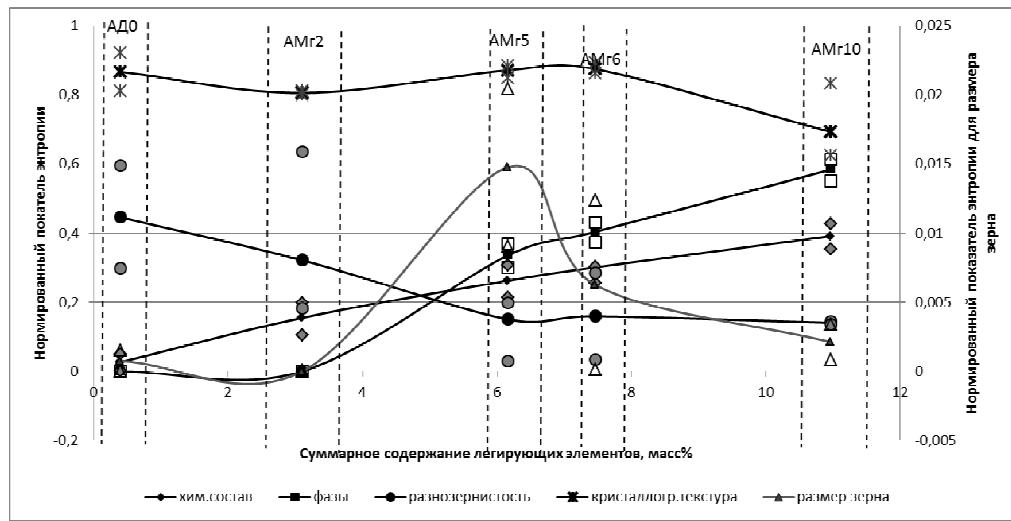


Рис.2. Весовые доли структур в общей структурной энтропии листов из алюминиевых сплавов в отожжённом состоянии

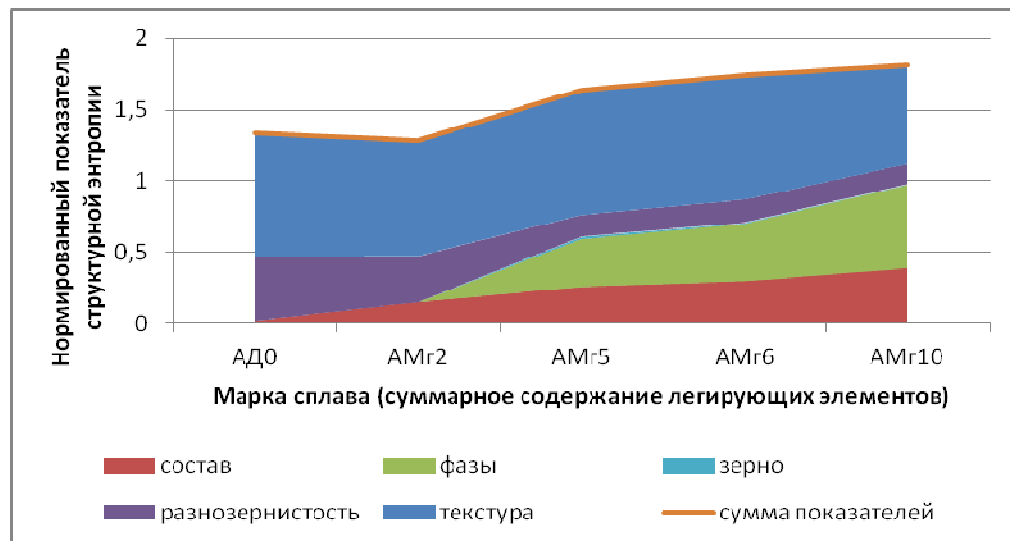
Fig.2. Part of structural features in the common structural entropy of commercial aluminum and aluminum alloys Al-2Mg mass %, Al-5Mg mass %, Al-6Mg mass %, Al-10Mg mass %

По мере добавления легирующих элементов (рис.1) в сплавах АМг5, АМг6 и АМг10 возрастает влияние фаз и энтропия размера зерна. При этом влияние разнорзерности снижается, т.к. размер зерна становится более

однородным. В сплавах АМг5, АМг6 и АМг10 в отожжённом состоянии ключевыми факторами структуры, также, как и в техническом алюминии и низколегированном сплаве АМг2, являются текстурная энтропия и энтропия фаз.



а)



б)

Рис.3. Изменение доли структур в общей структурной энтропии листов из технического алюминия и алюминиевых сплавов АМг2, АМг5, АМг6 и АМг10 в зависимости от суммарного содержания легирующих элементов: а) точечная диаграмма, б) диаграмма с накоплением

Fig.3. Part of the every structural entropy in the common structural entropy of commercial aluminum and aluminum alloys Al-2Mg mass %, Al-5Mg mass % Al-6Mg mass %, Al-10Mg mass % for different alloying element content: a) point diagram, b) yield diagram

Обобщённые диаграммы зависимости структурной энтропии от суммарного содержания легирующих элементов (рис.3) в сплавах в отожжённом состоянии показывают, что легирование приводит к плавному росту энтропии смешивания (химического состава); энтропия фазового состава начинает изменяться только при достижении предельной растворимости

магния, которая составляет около 2% [30]. Точечная диаграмма (рис.3а) позволяет детально провести анализ изменения энтропии каждой структуры, а диаграмма с накоплением (рис.3б) – провести анализ изменения доли влияния каждого слагаемого в их сумме.

Из рис.3б видно, что с повышением содержания магния в сплавах плавно увеличивается

энтропия химического и фазового составов, снижается энтропия разнотерности, слабо изменяется текстурная энтропия, но она занимает наибольшую долю влияния из всех рассмотренных структурных особенностей, а влияние размера зерна практически не наблюдается.

На точечной диаграмме (рис.3а) для сплавов АМг5 и АМг6 наблюдается повышение структурной энтропии от размера зерна. Это связано с тем, что размер зерна зависит не только от количества легирующих элементов, но и других факторов, таких как размер зерна исходной структуры, степень холодной деформации и температура нагрева при отжиге [37]. В связи с этим, размер зерна в сплаве АМг5 мог

оказаться меньше, а энтропия от влияния этой структурной особенности – выше по причине не равных условий получения размера зерна. Однако, если обратить внимание на масштаб шкалы показателей энтропии от размера зерна, то она отличается от шкалы для анализа остальных структурных особенностей на 3 порядка. Это означает, что доля, вносимая размером зерна в общую структурную энтропию, ничтожно мала по сравнению с другими факторами. Вероятно, что при измельчении зёрненной структуры до микронного и нанометрового диапазона этот фактор будет приводить к увеличению структурной энтропии и доли влияния размера зерна на свойства материала.

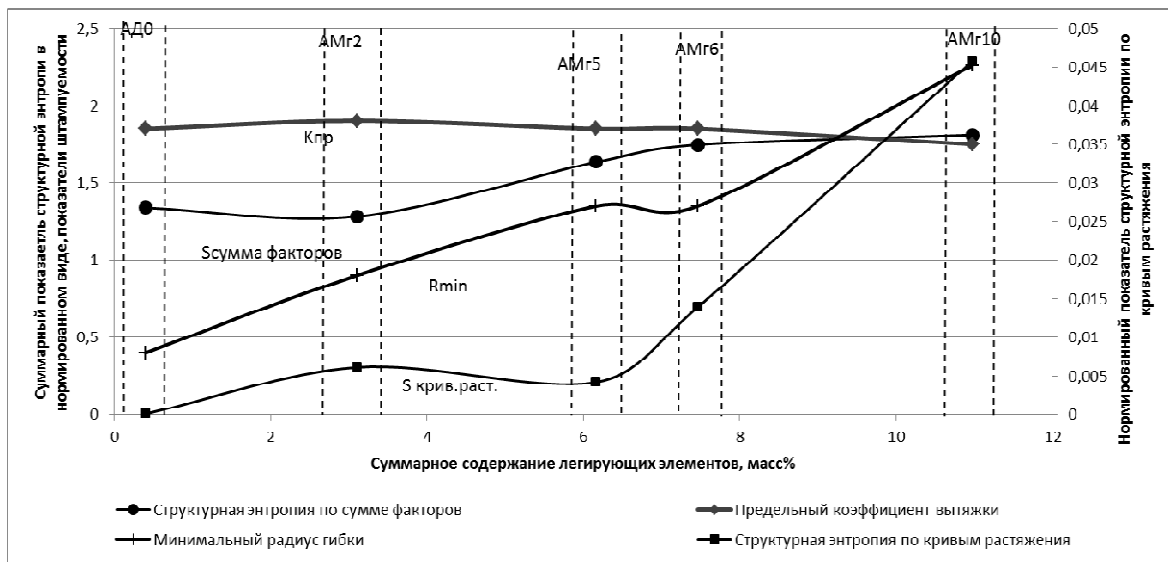


Рис.4. Изменение структурной энтропии и показателей штампуемости листов из технического алюминия и алюминиевых сплавов АМг2, АМг5, АМг6 и АМг10 в зависимости от суммарного содержания легирующих элементов

Fig.4. Structural entropy chart and stamp ability indexes via common alloying element content of sheets of commercial aluminum and aluminum alloys Al-2Mg mass %, Al-5Mg mass %, Al-6Mg mass %, Al-10Mg mass %

Вызывает интерес соответствие между собой результатов расчёта структурной энтропии, рассчитанной по различным методикам: на основании аппроксимации кривых растяжения и на основании учёта различных структурных факторов, показанное на рис.4.

Из рис.4 видно, что характер изменения энтропии, значения которой получены по разным методикам, совпадает. Наблюдаются различия в порядке значений структурной энтропии, рассчитанной по кривым растяжения, которые на 3 порядка ниже, чем полученные в результате суммирования факторов. Обратим внимание, что обе зависимости построены по значениям в нормированном виде и не имеют размерности,

т.е. представлены без умножения на универсальную газовую постоянную. Различия в значениях могут быть связаны с тем, методика расчёта структурной энтропии по кривым растяжения образцов требует проведения аппроксимации, которая имеет расхождения с экспериментальными точками реальной кривой. Кроме того, нормирование показателей напряжений на кривой растяжения выполнено путём деления напряжений на модуль Юнга, по предположению авторов [29] максимально достижимые значения напряжений в металле, а этот показатель на несколько порядков превышает предел прочности.

В качестве примера влияния структуры на свойства листов можно провести сравнение изменений структурной энтропии и характеристик штампуемости (предельного коэффициента вытяжки и минимального радиуса гибки) в зависимости от суммарного содержания легирующих элементов (рис.4). Из рис.4 видно, что энтропия, вносимая кристаллографической текстурой, и предельный коэффициент вытяжки изменяются единообразно с ростом степени легирования: предельный коэффициент вытяжки меняется слабо, как и уровень текстурной энтропии. Минимальный радиус гибки увеличивается с ростом степени легирования, как и энтропия химического и фазового составов.

Выводы

Увеличение суммарного содержания легирующих элементов в листовых образцах из алюминиевых сплавов системы Al-Mg от 0 до 11 масс. % приводит к повышению структурной энтропии, вносимой фазовым составом, и понижению структурной энтропии, вносимой кристаллографической текстурой, размером зерна и разноразмерностью. Наибольшую долю в структурной энтропии сплавов занимает текстурная энтропия, которая составляет от 38 % в сплаве AMg10 до 63 % в техническом алюминии. Размер зерна в сплавах с типичной для алюминиевых сплавов поликристаллической структурой вносит наименьший вклад в общую структурную энтропию, не превышая в ней 1%.

Значения структурной энтропии в нормированном виде, рассчитанные с помощью двух подходов, различаются на 3 порядка, однако характер их зависимости от содержания легирующих элементов имеет похожий характер.

Показатели штампуемости сплавов АД0, AMg2, AMg5, AMg6, AMg10 зависят от различных структурных особенностей: предельный коэффициент вытяжки изменяется незначительно, как и структурная энтропия, вносимая кристаллографической текстурой. Минимальный радиус гибки повышается, также, как энтропия смешивания и фазового состава. Т.е. отдельные элементы структуры оказывают различное влияние на технологические свойства листовых алюминиевых сплавов.

Список литературы

1. Zhong H., Rometsch P.A. et al. The influence of Mg/Si ratio and Cu content on the stretch

formability of 6xxx aluminium alloys // Mater. Sci. Eng. A. 2016. V. 651. P. 688–697.

2. Baranov V.N., Sidelnikov S.B. et al. Investigation of mechanical properties of cold-rolled, annealed and welded semi-finished products from the test alloys of Al-Mg system, economically alloyed with scandium // IOP Conf. Ser.: Mat. Sci.Eng. 2018. P. 012015.

3. Cheng Ch.-Y., Yang Y.-Ch. et al. Physical metallurgy of concentrated solid solutions from low-entropy to high-entropy alloys // Current Opinion in Solid State and Materials Science. 2017. N 21. P. 299–311.

4. Bouquerel J., Diawara B. et al. Investigations of the microstructural response to a cold forging process of the 6082-T6 alloy // Mater. Des. 2015. N 68. P. 245–258.

5. Moy Ch.K.S., Weiss M. et al. Influence of heat treatment on the microstructure, texture and formability of 2024 aluminium alloy // Mater. Sci. Eng. A. 2012. V. 552. P. 48–60.

6. Engler O., Schäfer C. and Myhr R. Effect of natural ageing and pre-straining on strength and anisotropy in aluminium alloy AA 6016 // Mater. Sci. Eng. A. 2015. V. 639. P. 65–74.

7. Беспалов В.М., Сидельников С.Б. и другие. Исследование влияния параметров процесса совмещенного литья и прокатки-прессования на структуру и свойства деформированных полуплавок из сплавов системы Al-Zr с различным содержанием легирующих элементов // Производство проката. 2019. № 3. С. 21–28.

8. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. и другие. Исследование структуры и свойств высокоэнтропийного сплава AlCoCrFeNi после электронно-пучковой обработки // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2021. Т. 18, № 2. С. 154–164.

9. Ivanov Y.F., Leonov A.A. et al. Changes in surface structure and mechanical characteristics of Al-5 wt%Si alloy after irradiation by electron beam // Materials Letters. 2020. V. 275. P. 128105.

10. Калашников И.Е. Болотова Л.К. и другие. Антифрикционный композиционный материал на основе сплава системы Al-Sn // Физика и химия обработки материалов. 2020. № 2. С. 65–71.

11. Wenyu M., Wang B. et al. Influence of solution heat treatment on mechanical response and fracture behaviour of aluminium alloy sheets: An experimental study // Mater. Des. 2015. V. 88. P. 1119–1126.

12. Patlan V., Vinogradov A. et al. Overview of fatigue properties of fine grain 5056 Al-Mg alloy processed by equal-channel angular pressing // *Mat. Sci. Eng. A*. 2001. V. 300, N 1-2. P. 171–182.
13. Hmida R. Ben, Thibaud S. et al. Influence of the initial grain size in single point incremental forming process for thin sheets metal and microparts: Experimental investigations // *Mat. Des.* 2013. V. 45. P. 155–165.
14. Donatus U., Thompson G.E. et al. Features in aluminium alloy grains and their effects on anodizing and corrosion // *Surf. Coat. Technol.* 2015. V. 277. P. 91–98.
15. Pedersen K.O., Westermann I. et al. Influence of microstructure on work-hardening and ductile fracture of aluminium alloys // *Mater. Des.* 2015. V. 70. P. 31–44.
16. Zhao Q., Holmedal B. Influence of dispersoids on grain subdivision and texture evolution in aluminium alloys during cold rolling // *Trans. Non-ferrous Met. Soc. China*. 2014. V. 24. P.2072–2078.
17. Bryukhovetsky V.V., Poyda V.P. et al. Phase transformations and structural changes in the course of the high-temperature superplastic deformation of aluminum alloys // *Phys. Met. Metallography*. 2010. V. 110, N 6. P. 614–623.
18. Engler O. Texture and anisotropy in the Al-Mg alloy AA 5005–Part I: Texture evolution during rolling and recrystallization // *Mater. Sci. Eng. A*. 2014. V. 618. P. 654–662
19. Engler O. Texture control by thermomechanical processing of AA6XXX Al-Mg-Si sheet alloys for automotive applications—a review // *Mater. Sci. Eng. A*. 2002. V. 336, Iss. 1–2. P. 249–262.
20. Shan D., Zhen L. Aging behavior and microstructure evolution in the processing of aluminum alloys // *Microstructure Evolution in Metal Forming Processes*. 2012. V. 10. P. 267–297.
21. Bobruk E.V., Safargalina Z.A. et al. The effect of ultrafine-grained states on superplastic behavior of Al-Mg-Si alloy // *Mater. Lett.* 2019. V. 25515. Article 126503.
22. Syryamkin R.S., Gorbunov Y.A. et al. Investigation into the influence of the degree of grinding of the ingot grain structure of the 6063 alloy on its plasticity, extruding parameters, and properties of extruded profiles // *Rus. J. Non-Ferr. Met.* 2019. V. 60, N 1. P. 35–40.
23. Janssen P.J.M., de Keijser Th. H. et al. An experimental assessment of grain size effects in the uniaxial straining of thin Al sheet with a few grains across the thickness // *Mater. Sci. Eng. A*. 2006. V. 419. P. 238–248.
24. Asadikiya M., Zhang Y. et al. Design of ternary high-entropy aluminum alloys (HEAls) // *J. Alloys and Compounds*. 2022. V. 891. P. 161836.
25. Abere M.J., Ziade E. et al. A predictive analytical model of thermal conductivity for aluminum/transition metal high-entropy alloys // *Scripta Materialia*. 2022. V. 208. P. 114330.
26. Xu H., Li Z. et al. Aluminum and titanium alloyed non-equiatomic Co-Fe-Ni medium-entropy alloy with ultra high strength and hardness // *Mat. Sci. Eng.: A*. 2021. V. 817. P. 141297.
27. Sathyanarayana Raju CH.V., Venugopal D. et al. Effect of aluminum addition on the properties of CoCuFeNiTi high entropy alloys // *Materials Today: Proceedings*. 2018. V. 5, Is. 13, Part 3. P. 26823–26828.
28. Колбасников Н.Г., Кондратьев С.Ю. Структура. Энтропия. Фазовые превращения и свойства металлов. СПб.: СПбГПУ, 2006. 363 с.
29. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1979. 640 с.
30. Wang H., Geng H. et al. Multiple strengthening mechanisms in high strength ultrafine-grained Al-Mg alloys // *Mater. Sci. Eng. A*. 2020. V. 771. P. 138613.
31. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Материаловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник для вузов – 3-е изд., перераб. и доп. М.: МИСИС, 1999. 410 с.
32. Мальцев М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов (с прил. атласа макро- и микроструктур). М: Металлургия, 1970. 364 с.
33. Туманов А.Т. Авиационные материалы. Т.4. Алюминиевые и бериллиевые сплавы: Справочник. М.: Металлургия, 1958. 528 с.
34. Носова Е.А. Исследование энтропии кристаллографической текстуры листовых алюминиевых сплавов после деформации и термической обработки // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2019. Т. 16, № 2. С. 269–274.
35. Носова Е.А. Применение энтропийного подхода для анализа стадий старения сплава Д16 // *МиТОМ*. 2020. № 6(780). С. 22–26.
36. Рогельберг И.Л., Шпичинецкий Е.С. Диаграммы рекристаллизации металлов и сплавов: справочник. М.:ГНТИЛЧЦМ, 1950. 280 с.

Информация об авторах

Е. А. Носова – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология металлов и авиационное материаловедение» Самарского национального исследовательского университета.

А. П. Амосов – Заслуженный деятель науки РФ доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» Самарского государственного технического университета.

References

- Zhong, H. & Rometsch, P. A. et al. (2016). The influence of Mg/Si ratio and Cu content on the stretch formability of 6xxx aluminium alloys. *Mater. Sci. Eng. A*, (651), 688–697.
- Baranov, V. N. & Sidelnikov, S. B. et al. (2018). Investigation of mechanical properties of cold-rolled, annealed and welded semi-finished products from the test alloys of Al-Mg system, economically alloyed with scandium. *IOP Conf. Ser.: Mat. Sci. Eng.*, 012015.
- Cheng, Ch.-Y. & Yang, Y.-Ch. et al. (2017). Physical metallurgy of concentrated solid solutions from low-entropy to high-entropy alloys. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, (21), 299–311.
- Bouquerel, J. & Diawara, B. et al. (2015). Investigations of the microstructural response to a cold forging process of the 6082-T6 alloy. *Mater. Des.*, (68), 245–258.
- Moy, Ch. K. S. & Weiss M. et al. (2012). Influence of heat treatment on the microstructure, texture and formability of 2024 aluminium alloy. *Mater. Sci. Eng. A*, (552), 48–60.
- Engler, O., Schäfer, C. & Myhr R. (2015). Effect of natural ageing and pre-straining on strength and anisotropy in aluminium alloy AA 6016. *Mater. Sci. Eng. A*, (639), 65–74.
- Bespalov, V. M. & Sidelnikov S. B. et al. (2019). Research of combined casting and rolling-extrusion effect on structure and properties of worked semi-products of alloys of Al-Zr. *Rolling production*, 3, 21–28. (In Russ.).
- Ivanov, U. F. & Gromov V.E. et al. (2021). Research of structure and properties of high-entropy alloy AlCoCrFeNi after electron-beam treatment. *Fundamental problems of modern material science*. 2(18), 154–164. (In Russ.).
- Ivanov, Y. F. & Leonov, A. A. et al. (2020). Changes in surface structure and mechanical characteristics of Al-5 wt%Si alloy after irradiation by electron beam. *Materials Letters*, (275), 128105. (In Russ.).
- Kalashnikov, I. E. & Bolotova, L. K. et al. (2020). Antifriction composite material based on an alloy of the Al-Sn system. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2, 65–71. (In Russ.).
- Wenyu, M. & Wang, B. et al. (2015). Influence of solution heat treatment on mechanical response and fracture behaviour of aluminium alloy sheets: An experimental study. *Mater. Des.*, (88), 1119–1126.
- Patlan, V. & Vinogradov, A. et al. (2001). Overview of fatigue properties of fine grain 5056 Al-Mg alloy processed by equal-channel angular pressing. *Mat. Sci. Eng. A*, 1-2(300), 171–182.
- Hmida, R. Ben & Thibaud, S. et al. (2013). Influence of the initial grain size in single point incremental forming process for thin sheets metal and microparts: Experimental investigations. *Mat. Des.*, (45), 155–165.
- Donatus, U. & Thompson, G. E. et al. (2015). Features in aluminium alloy grains and their effects on anodizing and corrosion. *Surf. Coat. Technol*, (277), 91–98.
- Pedersen, K. O. & Westermann, I. et al. (2015). Influence of microstructure on work-hardening and ductile fracture of aluminium alloys. *Mater. Des.*, (70), 31–44.
- Zhao, Q. & Holmedal, B. (2014). Influence of dispersoids on grain subdivision and texture evolution in aluminium alloys during cold rolling. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, (24), 2072–2078.
- Bryukhovetsky, V. V. & Poyda, V. P. et al. (2010). Phase transformations and structural changes in the course of the high-temperature superplastic deformation of aluminum alloys. *Phys. Met. Metallography*, 6(110), 614–623.
- Engler, O. (2014). Texture and anisotropy in the Al-Mg alloy AA 5005–Part I: Texture evolution during rolling and recrystallization. *Mater. Sci. Eng. A*, (618), 654–662.
- Engler, O. (2002). Texture control by thermomechanical processing of AA6XXX Al-Mg-Si sheet alloys for automotive applications—a review. *Mater. Sci. Eng. A*, 1-2(336), 249–262.
- Shan, D. & Zhen, L. (2012). Aging behavior and microstructure evolution in the processing of aluminum alloys. *Microstructure Evolution in Metal Forming Processes*, (10), 267–297.

21. Bobruk, E. V. & Safargalina, Z. A. et al. (2019). The effect of ultrafine-grained states on superplastic behavior of Al-Mg-Si alloy. *Mater. Lett.*, (25515), 126503.
22. Syryamkin, R. S. & Gorbunov, Y. A. et al. (2019). Investigation into the influence of the degree of grinding of the ingot grain structure of the 6063 alloy on its plasticity, extruding parameters, and properties of extruded profiles. *Rus. J. Non-Ferr. Met.*, 1(60), 35–40.
23. Janssen, P. J. M. & de Keijser, Th. H. et al. (2006). An experimental assessment of grain size effects in the uniaxial straining of thin Al sheet with a few grains across the thickness. *Mater. Sci. Eng. A*, (419), 238–248.
24. Asadikiya, M. & Zhang, Y. et al. (2022). Design of ternary high-entropy aluminum alloys (HEAs). *J. Alloys and Compounds*, (891), 161836.
25. Abere, M. J. & Ziade, E. et al. (2022). A predictive analytical model of thermal conductivity for aluminum/transition metal high-entropy alloys. *Scripta Materialia*, (208), 114330.
26. Xu, H. & Li, Z. et al. (2021). Aluminum and titanium alloyed non-equiatom Co-Fe-Ni medium-entropy alloy with ultra high strength and hardness. *Mat. Sci. Eng. A*, (817), 141297.
27. Sathyanarayana Raju, C. H. V. & Venugopal, D. et al. (2018). Effect of aluminum addition on the properties of CoCuFeNiTi high entropy alloys. *Materials Today: Proceedings*, 13(5), Part 3, 26823–26828.
28. Kolbasnikov, N. G. & Kondratyev, S. Yu. (2006). Structure. Entropy. Phase transformations and properties of metals. SPb: SPbSPU. P. 363. (In Russ.).
29. Mondolfo, L. F. (1979). Structure and properties of aluminum alloys. M: Metallurgy. P. 640. (In Russ.).
30. Wang, H. & Geng, H. et al. (2020). Multiple strengthening mechanisms in high strength ultrafine-grained Al-Mg alloys. *Mater. Sci. Eng. A*, (771), 138613.
31. Kolachev, B. A., Elagin, V. I. & Livanov, V. A. (1999). Materials science and heat treatment of non-ferrous metals and alloys: textbook for universities. M: MISIS. P. 410. (In Russ.).
32. Maltsev, M. V. (1970). Metallography of industrial non-ferrous metals and alloys (with an appendix of an atlas of macro- and microstructures). M: Metallurgy, P. 364. (In Russ.).
33. Tumanov, A. T. (1958). Aviation materials. V.4. Aluminum and beryllium alloys: Reference book. M: Metallurgy. P. 528. (In Russ.).
34. Nosova, E. A. (2019). Investigation of the entropy of the crystallographic texture of sheet aluminum alloys after deformation and heat treatment. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 2(16), 269–274. (In Russ.).
35. Nosova, E. A. (2020). Application of the entropy approach for the analysis of aging stages of alloy D16. *MiTOM*, 6(780), 22–26. (In Russ.).
36. Rogelberg, I. L. & Shpichinetskiy, E. S. (1950). Recrystallization diagrams of metals and alloys: reference book. M: GNTILCHTSM. P. 280. (In Russ.).

Information about the authors

E. A. Nosova – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of Metal Technology and Aviation Material Science, Samara National Research University.

A. P. Amosov – Honored Scientist of Russian Federation, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Metal Science, Powder Metallurgy and Nanomaterials, Samara State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30.12.2021; одобрена после рецензирования 12.01.2022; принята к публикации 20.01.2022.

The article was received by the editorial board on 30 Dec. 21; approved after reviewing 12 Jan. 22; accepted for publication 20 Jan. 22.