

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА АППРОКСИМИРУЮЩЕЙ ФУНКЦИИ КРИВЫХ РАСТЯЖЕНИЯ НА СТРУКТУРНУЮ ЭНТРОПИЮ ЛИСТОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Е.А. Носова, Н.В. Селиверстова

Однородность структуры листовых полуфабрикатов определяет их способность к операциям листовой штамповки. Характеристикой однородности структуры может служить разнотельность, однородность распределения дисперсных фаз, характер распределения остаточных напряжений и уровень структурной энтропии. В работе для расчёта структурной энтропии выполнен математический анализ кривых растяжения листовых заготовок из алюминиевых сплавов АД0, АМг2, АМг6, Д16, полученных после холодной деформации и отжига при температурах 250, 350 и 450 °С. Подобраны аппроксимирующие функции к кривым растяжения, позволившие рассчитать уровень структурной энтропии. Проведено сравнение результатов выбора двух видов аппроксимирующих функций: квадратичной и степенной. Установлено, что выбор степенной функции в качестве аппроксимирующей позволяет выявить корреляцию между структурной энтропией и показателями основных механических свойств. Применение аппроксимирующей функции квадратичной параболы приводит к отсутствию корреляции между структурной энтропией и показателями предела прочности, предела текучести, относительного удлинения и модуля Юнга. Подобраны формулы и коэффициенты для расчёта структурной энтропии для выбранных марок сплавов по данным основных механических свойств: предела текучести, предела прочности, относительного удлинения, модуля Юнга. С помощью эмпирических формул рассчитаны зависимости структурной энтропии сплавов АД0, АМг2 и АМг6 от степени холодной пластической деформации, показавшие убывание энтропии с ростом степени деформации.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, структурная энтропия, штампуемость, холодная деформация, механические свойства, термическая обработка, кривые растяжения, степенная функция.

ВВЕДЕНИЕ

Порядок в структуре сплавов может оказывать влияние на механические и технологические свойства [1]. Количественной мерой порядка можно считать величину конфигурационной энтропии [2–4]. Её обычно вычисляют по формуле [5]:

$$\Delta S_{conf} = -R \sum_{i=1}^n X_i \times \ln X_i, \quad (1)$$

где n – количество компонентов;

X_i – мольная доля компонента;

$R = 8,314$ Дж/моль·°С;

K – универсальная газовая постоянная.

Эту формулу также можно применять для оценки однородности зёрненной структуры, где за величину X можно принять долю зёрен определённой величины, а n – количество таких вариаций. Однако ранжирование зёрненной структуры по размеру зерна представляет собой определённую техническую задачу, имеющую многовариантность решений в зависимости от выбора интервалов изменения зёрненной структуры. Аналогичный приём можно применить и в отношении фазового состава, оценивая характер распределения частиц дисперсных фаз в пределах зерна или изделия, выбирая за X в формуле 1

расстояние между частицами. Однако предложенный способ для оценки однородности структуры не учитывает вероятность нагартовки.

Как известно, структура, а, следовательно, и структурная (или конфигурационная) энтропия в процессе обработки сплавов, например, пластической деформации и термической обработки, может изменяться [6–7]. При этом характер распределения фаз и размер зерна может оставаться без изменений.

Изменение структурной энтропии можно оценить с помощью измерения энергии, поглощённой или рассеянной материалом в процессе структурных изменений. Н.Г. Колбасниковым предложен подход для оценки изменения структурной энтропии на основании результатов стандартных испытаний на одноосное растяжение [8]. Этот метод строится на допущении, что кривая растяжения представляет собой распределение внутренних напряжений в металле при деформировании.

Указанная методика предполагает выполнение математического анализа кривых растяжения, но не всегда эти кривые растяжения доступны в справочной литературе. Однако, как будет показано ниже, в самой

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА АППРОКСИМИРУЮЩЕЙ ФУНКЦИИ КРИВЫХ РАСТЯЖЕНИЯ НА СТРУКТУРНУЮ ЭНТРОПИЮ ЛИСТОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

структуре формулы для расчёта структурной энтропии содержатся переменные, представляющие собой предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и модуль Юнга, которые являются основными механическими свойствами, содержащимися в большинстве справочников [9].

Исследуемые в работе алюминиевые сплавы применяются в различных конструкциях в виде штампованных изделий. Их качество определяется сочетанием механических свойств и точности геометрии, которые, в свою очередь, зависят от структурной однородности.

Предлагаемая статья представляет результаты обработки диаграмм растяжения алюминиевых сплавов АД0, АМг2, АМг6, Д16 после холодной пластической деформации и рекристаллизационного отжига. Показана связь между структурной энтропией и основными механическими свойствами. Подробно изложена методика расчёта структурной энтропии на основании диаграмм растяжения.

МЕТОДИКА И МАТЕРИАЛЫ

В качестве исходных заготовок применяли алюминиевые сплавы АМг2 и АМг6, АД0 и Д16 в виде листовых заготовок толщиной 1,5...2 мм. Отжиг образцов из сплава АМг2 и АМг6 после холодной прокатки со степенью обжатия 20 % проводили при температурах 250, 350, 450 °С в течение 30 минут. Отжиг образцов из сплава АД0 и Д16 после холодной прокатки со степенью обжатия 20 % проводили при температурах 500 °С и 420 °С соответственно в течение 3–33 минут [10].

Для установления механических свойств и расчета структурной энтропии образцы подвергали испытаниям на одноосное растяжение по ГОСТ 1497 и ГОСТ 11701.

Методика расчёта структурной энтропии по полученным диаграммам растяжения заключалась в следующем.

Согласно положениям, изложенным в монографии [8], структурная энтропия может быть рассчитана по формуле:

$$\Delta S_{cmp} = -R \int_{\sigma=0}^{\sigma=\sigma_{max}} f(\sigma^*) \times \ln f(\sigma^*) d\sigma^*,$$

где $f(\sigma^*)$ – плотность вероятности безразмерного предела текучести.

Безразмерная величина напряжений может быть рассчитана по формуле $\sigma^* = \sigma/E$, где σ – размерные значения напряжений (МПа), E – модуль нормальной упругости Юнга (МПа).

Для нахождения $f(\sigma^*)$ в этой же монографии предложена методика анализа кривых растяжения образцов с различной степе-

ню дефектности (деформации, отжига, упрочняющей термообработки). Для этого необходимо провести испытания на одноосное растяжение и для кривой растяжения подобрать аппроксимирующую функцию с максимальным коэффициентом корреляции.

Например, для образца из сплава АМг6 после холодной деформации и отжига при температуре 250 °С в течение 3 минут проведены испытания на одноосное растяжение, диаграмма растяжения представлена на рисунке 1.

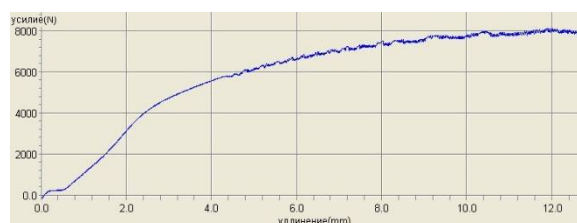


Рисунок 1 – Экспериментальная кривая растяжения образца из сплава АМг6 после холодной деформации и отжига при температуре 250 °С в течение 3 минут

Для полученной экспериментальной кривой можно подобрать аппроксимирующую зависимость напряжений от деформаций нескольких видов, включая степенную, логарифмическую, полинома и другие. Например, на рисунке 2 показаны два вида аппроксимирующих зависимостей для кривой, представленной на рисунке 1:

- 1) с уравнением полиномиальной функцией вида $\sigma = \sigma_{T0} + \alpha_1 \cdot \varepsilon + \alpha_2 \cdot \varepsilon^2$;
- 2) с уравнением степенной функцией вида $\sigma = \alpha \cdot \varepsilon^b$;
- 3) $\sigma = 700,27 \varepsilon^{0,4533}$ с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,9873$.

Зависимость экспериментальных точек и аппроксимирующих функций представлена на рисунке 2.

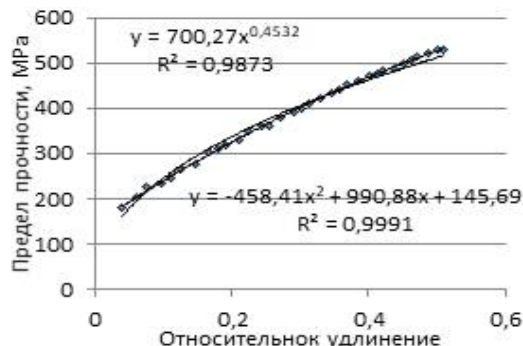


Рисунок 2 – Аппроксимирующие зависимости с уравнением степенной и полиномиальной функциями для экспериментальных данных, полученных при растяжении образца из сплава АМг6 после холодной деформации и отжига при температуре 250 °С в течение 3 минут

В опубликованных ранее работах [11, 12] в качестве аппроксимирующей функции выбирали функцию полинома, однако при нахождении корреляции между структурной энтропией и основными механическими свойствами не было выявлено совпадений. Поэтому в качестве аппроксимирующей функции в данном исследовании выбрана степенная. После применения степенной функции появились линейные зависимости между структурной энтропией и механическими свойствами.

Определим $\Delta S_{стр}$ для этой зависимости:

$$f(\sigma^*) = -\frac{h+1}{E} \times \alpha\beta(\beta-1)\epsilon^{\beta-2},$$

где h – параметр упрочнения, при $\epsilon \rightarrow \infty$.

Модуль Юнга E можно найти как отношение σ_i/ϵ_i при $\epsilon \rightarrow 0$.

Для рассматриваемой диаграммы растяжения $E = 4663$.

Так как за ϵ принимаем максимальное относительное удлинение, то в расчетах можно использовать относительное удлинение δ , взятое из справочников.

Показатель h находим соотношения $\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \frac{h \times E}{1+h}$, при $\epsilon \rightarrow \infty$: отсюда $h = \frac{E - \frac{d\sigma}{d\epsilon}}{\frac{d\sigma}{d\epsilon}}$.

При испытаниях максимальная деформация составила $\epsilon = 0,51$, тогда при $\epsilon \rightarrow \infty$, $\frac{d\sigma}{d\epsilon} = 178$

$$\text{Отсюда } h = \frac{\frac{d\sigma}{d\epsilon}}{E - \frac{d\sigma}{d\epsilon}} = 178 / (4663 - 178) = 0,04.$$

$$\text{Тогда } f(\sigma^*) = -\frac{h+1}{E} \times \alpha\beta(\beta-1)\epsilon^{\beta-2} = -((0,04 + 1)/4663 * 700,27 * 0,4532 * (0,4532 - 1) * 0,51^{0,4532-2}) = 0,029.$$

Тогда структурная энтропия

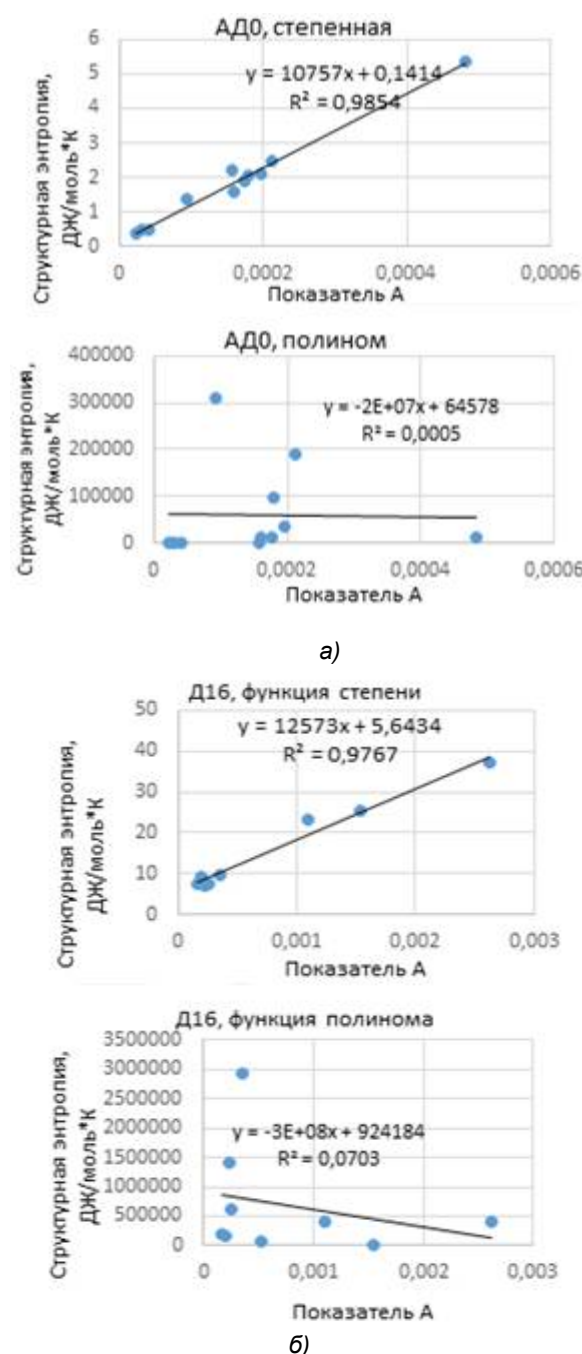
$$\Delta S_{стр} = -R \int_{\sigma=0}^{\sigma=\sigma_{max}} f(\sigma^*) \times \ln f(\sigma^*) d\sigma^* = -8,31 \int_{179}^{530} 0,029 \ln(0,029) d\sigma^* = -8,31 * 0,029 * \ln(0,029) * 351 = 296 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}.$$

Исходя из представленных результатов анализа кривых растяжения, структурная энтропия может быть рассчитана как функция $\Delta S_{стр} = f(\epsilon (\sigma_b - \sigma_{0,2})/E)$. Обозначим этот показатель как $A = \epsilon (\sigma_b - \sigma_{0,2})/E$ и найдём экспериментальные зависимости $\Delta S_{стр} = f(A)$.

Аналогично была подсчитана структурная энтропия для каждого образца из сплавов АМг2, Д16 и АД0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 3 представлена зависимость структурной энтропии и сочетания показателя основных механических свойств $A = \epsilon (\sigma_b - \sigma_{0,2})/E$ для степенной функции и показателя основных механических свойств $A = \epsilon (\sigma_b - \sigma_{0,2})/E$ для функции полинома для сплавов АД0, Д16, АМг2 и АМг6.



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА АППРОКСИМИРУЮЩЕЙ ФУНКЦИИ КРИВЫХ РАСТЯЖЕНИЯ НА СТРУКТУРНУЮ ЭНТРОПИЮ ЛИСТОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

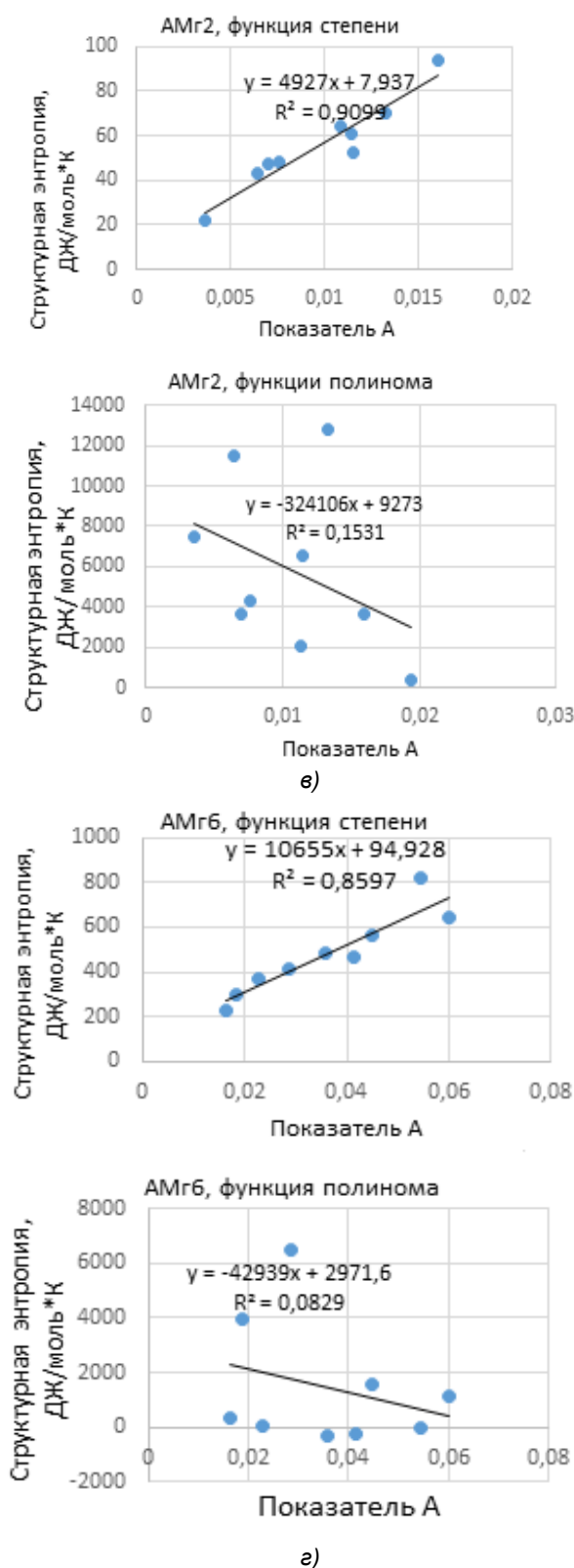


Рисунок 3 – Зависимость структурной энтропии и сочетания показателя основных механических свойств А для сплавов:

а) АД0; б) Д16; в) АМг2; г) АМг6

Из рисунка 3 видно, что для всех сплавов при выборе аппроксимирующей зависимости вида $\sigma = \alpha \cdot \epsilon^b$ наблюдается корреляция данных с высокой степенью, что говорит о хорошей сходимости данных. А для всех сплавов функции полинома наблюдается разброс экспериментальных точек и корреляция R отсутствует.

Отсюда следует, что для определения $\Delta S_{стр}$ уравнения будут иметь вид:

Для сплава АД0: $\Delta S_{стр} = 10,8 \cdot 10^3 \cdot (\sigma_{в} - \sigma_{0,2}) / E \cdot \epsilon + 0,14$;

для сплава Д16: $\Delta S_{стр} = 12,6 \cdot 10^3 \cdot (\sigma_{в} - \sigma_{0,2}) / E \cdot \epsilon + 5,6$;

для сплава АМг2: $\Delta S_{стр} = 4,9 \cdot 10^3 \cdot (\sigma_{в} - \sigma_{0,2}) / E \cdot \epsilon + 7,9$;

для сплава АМг6: $\Delta S_{стр} = 10,6 \cdot 10^3 \cdot (\sigma_{в} - \sigma_{0,2}) / E \cdot \epsilon + 94,9$.

На рисунке 4 представлен результат применения данных формул для расчета $\Delta S_{стр}$ по основным механическим характеристикам, взятых из справочника [13].

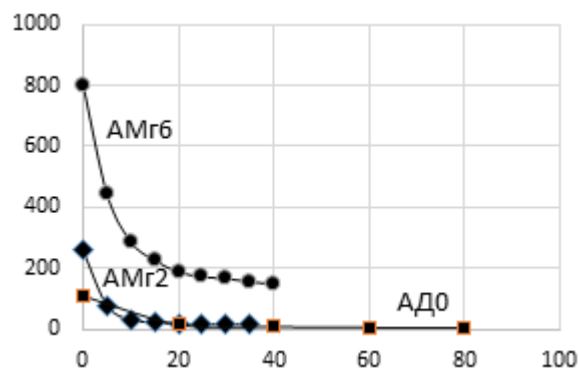


Рисунок 4 – Зависимость структурной энтропии от степени деформации для сплавов АД0, АМг2, АМг6

Из рисунка 4 видно, что сплав АМг6 с наибольшей концентрацией магния из рассмотренных сплавов имеет наибольший уровень структурной энтропии, что согласуется с результатами расчёта конфигурационной энтропии [14]. С ростом степени деформации уровень структурной энтропии уменьшается, что свидетельствует о повышении упорядоченности структуры с ростом степени холодной пластической деформации, что согласуется с результатами работ [15–16].

ВЫВОДЫ

Расчёт структурной энтропии листовых алюминиевых сплавов АД0, Д16, АМг2 и АМг6 на основании кривых растяжения показал, что для экспериментального графика возможен выбор нескольких аппроксимирующих

зависимостей. Применение аппроксимации в виде квадратичной зависимости напряжений и деформаций не позволяет рассчитать структурную энтропию с использованием показателей основных механических свойств: предела текучести, предела прочности, относительного удлинения и модуля Юнга. Применение полученных эмпирических формул позволило выявить влияние холодной пластической деформации на повышение упорядоченности в структуре сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров, В.М. *Материаловедение и технология конструкционных материалов : учеб. пособие. Часть 1. Материаловедение. Стандарт третьего поколения* / В.М. Александров // Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2015. – 327 с.
2. Регель, А.Р. *Периодический закон и физические свойства электронных расплавов* / А.Р. Регель, В.М. Глазов. – М. : Наука, 1978. – 306 с.
3. Регель, А.Р. *Структура ближнего порядка в расплавах полупроводников* / А.Р. Регель, В.М. Глазов // Вести АН МР, 1967. – № 7. – 75 с.
4. Глазов, В.М. *Энтропия плавления металлов и полупроводников* / В.М. Глазов, А.А. Айвазов. – М. : Металлургия, 1980. – 286 с.
5. Kumar, K.P. *Fabrication and characterization of 2024 aluminium – High entropy alloy composites* / K.P. Kumar, M.G. Krishna, J.B. Rao // N.R.M.R. Bhargava Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – № 640. – P. 421–427.
6. *Effects of homogenization temperature on cracking during cold rolling of Al_{0.5}CoCrFeMnNi high-entropy alloy* / J. Moon [et al.] // Materials Chemistry and Physics. – 2018. – № 210. – P. 187–191.
7. *Microstructures and mechanical properties of mechanically alloyed and spark plasma sintered Al_{0.3}CoCrFeMnNi high entropy alloy* / R.M. Pohan [et al.] // Materials Chemistry and Physics. – 2018. – № 210. – P. 62–70.
8. Колбасников, Н.Г. *Теория обработки металлов давлением. Физические основы прочности и пластичности [Текст]* / Н.Г. Колбасников. – СПб. : Изд-во СПбПГУ, 2004. – 307 с.
9. Малеткина, Т.Ю. *Механические свойства металлов и сплавов и методы их определения : метод. указания* / Т.Ю. Малеткина. – Томск. : Изд-во ТГАСУ, 2009. – 5 с.
10. Шалина, Р.Е. *Алюминиевые и бериллиевые сплавы. Часть 1. Деформируемые алюминиевые сплавы и сплавы на основе бериллия. Книга 2 [Текст]* / Р.Е. Шалина. – ВИАМ, ОНТИ, 1982 г. – 18 с.
11. Селиверстова, Н.В. *Влияние структурной энтропии на штампуемость листов из алюминиевых сплавов АД0 (1011) и Д16 (1160)* / Н.В. Селиверстова // Ползуновский вестник. – 2019. – № 2. – 150 с.
12. Nosova, E. *Research of structural entropy of sheet aluminium alloys depending on annealing temperature* / E. Nosova, F. Grechnikov, N.V. Lukonina // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 224.
13. Третьяков, А.В. *Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением : справочник* / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин. – М. : «Металлургия», 1973. – 145 с.
14. Zezhou, Li. *Mechanical properties of high-entropy alloys with emphasis on facecentered cubic alloys* / Li. Zezhou, Z. Shiteng, O. Robert Ritchie, M.A. Meyers // Progress in Materials Science. – 2019. – Vol.102. – P. 296–345.
15. *Enhancement of strength-ductility trade-off in a high-entropy alloy through a heterogeneous structure* / S.W. Wu [et al.] // Acta Materialia. – 2019. – Vol.165. – P. 444–458.
16. George, E.P. *High entropy alloys : A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms* / E.P. George, W.A. Curtin, C.C. Tasan // Acta Materialia. – 2019.

Носова Екатерина Александровна,
к.т.н., доцент, Самарский университет,
e-mail: eanosova@mail.ru.

Селиверстова Наталья Викторовна,
аспирант, Самарский университет, e-mail:
lukonina.natalya@inbox.ru.