УДК 620.22

Особенности формирования структуры и свойств энтропийных сплавов на основе Ni-Co-Cr

Власов Иван Игоревич(*) vlasovteh@yandex.ru
Севальнев Герман Сергеевич herman92@mail.ru

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия

Аннотация. *В работе проведены исследования микроструктуры, фазового состава, трибологических характеристик, а также изменение механических свойств в зависимости от температуры испытания высокоэнтропийных сплавов на базе системы* Ni-Co-Cr *в эквимассовом, эквиатомном состояниях, а также эквиатомного с дополнительным легированием после вакуумной индукционной выплавки. По результатам исследований и испытаний было установлено, что структура сплавов состоит из ГЦК твердого раствора с избыточными фазами. При температуре испытания* 20 °*С происходит реализация механизма деформационного упрочнения, при повышенных температурах данный эффект отсутствует.*

***Ключевые слова*:** *энтропийные сплавы, легирование, структура, фазовый состав, твердость, механические свойства*

Features of the formation of the structure and properties of entropy alloys based on Ni-Co-Cr

Vlasov Ivan Igorevich(*) vlasovteh@yandex.ru
Sevalnev German Sergeevich herman92@mail.ru

NRS "Kurchatov Institute" — VIAM, Moscow, Russia

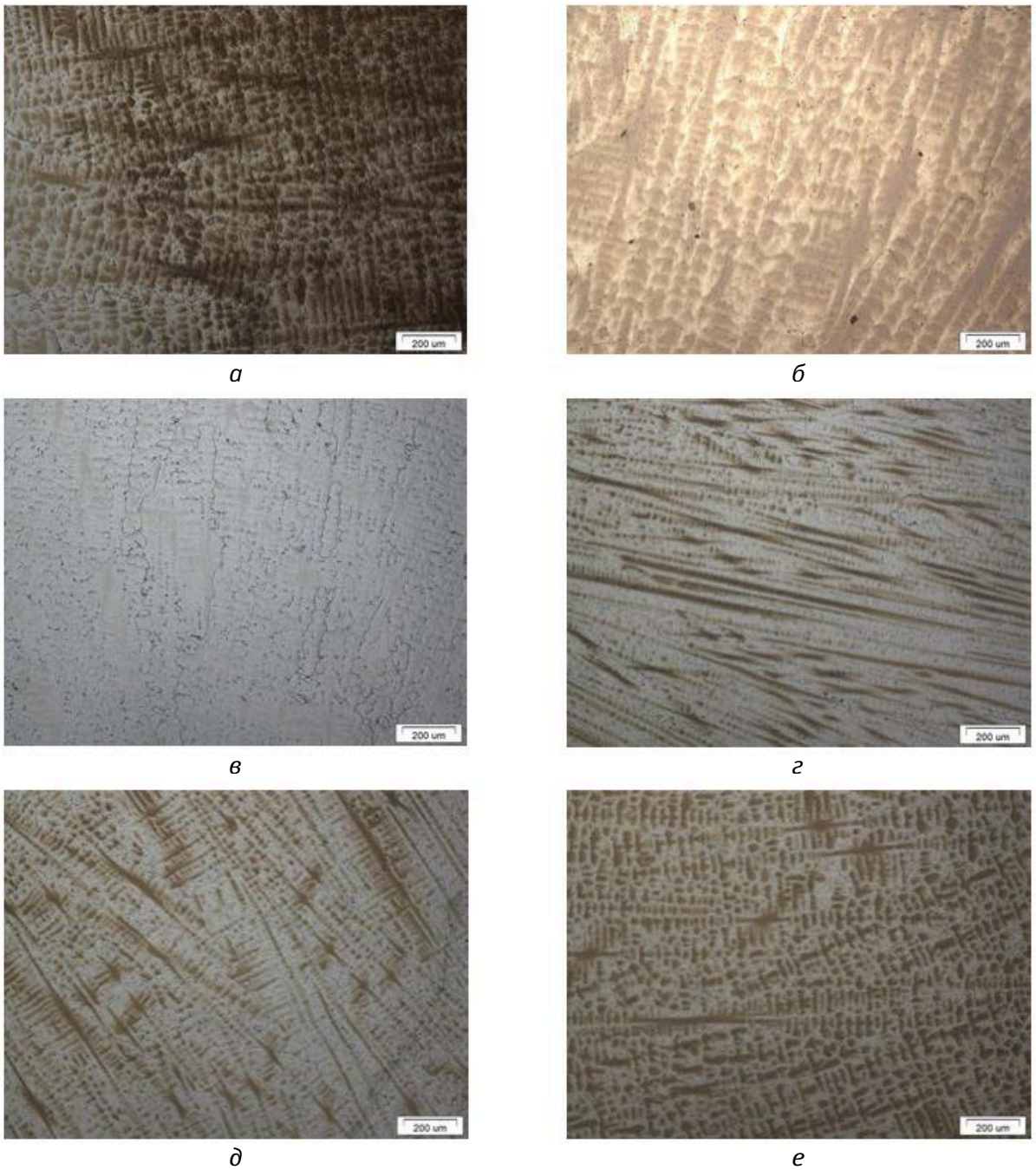
Absrtact. The work investigates the microstructure, phase composition, tribological characteristics, as well as changes in mechanical properties depending on the temperature of testing high-entropy alloys based on the Ni-Co-Cr system in equimassic, equiatomic states, as well as equiatomic with additional alloying after vacuum induction smelting. According to the results of research and testing, it was found that the structure of the alloys consists of a HCC solid solution with excess phases. At a test temperature of 20 °C, the deformation hardening mechanism is implemented, at elevated temperatures this effect is absent.

Keywords: entropy alloys, alloying, structure, phase composition, hardness, mechanical properties

Введение. В последние десятилетия наблюдается стремительный рост интереса к разработке и исследованию новых материалов, которые благодаря формируемой структуре могут обеспечить уникальный комплекс физико-механических характеристик [1–3]. Одним из наиболее перспективных направлений является разработка и исследование энтропийных сплавов (ЭС) или сплавов с высокой энтропией смешения [4, 5].

Материалы и методы. Объектами исследования выступали высокоэнтропийные сплавы на базе системы Ni-Co-Cr. Содержание Ni, Co и Cr реализовано в эквимассовом (1) и эквиатомном (2) состояниях, а также рассмотрена расширенная система легирования NiCoCrWNbAlTiReC (3) и NiCoCrWNbAlTiTaC с содержанием тантала 1 (4), 1,5 (5) и 3 (6) масс. %. Для легированных сплавов Общее содержание легирующих элементов составляет около 5…8 %.

Результаты. Микроструктура всех исследуемых сплавов энтропийных на базе системы Ni-Co-Cr представляет собой разнозернистую дендритную структуру (рис. 1). Значительных отличий в формируемой структуре в литом состоянии у исследуемых сплавов не наблюдается.



а *б* *в* *г* *д* *е*

Рис. 1. Микроструктура энтропийных сплавов 1-6 (*а-е*) после литья × 100

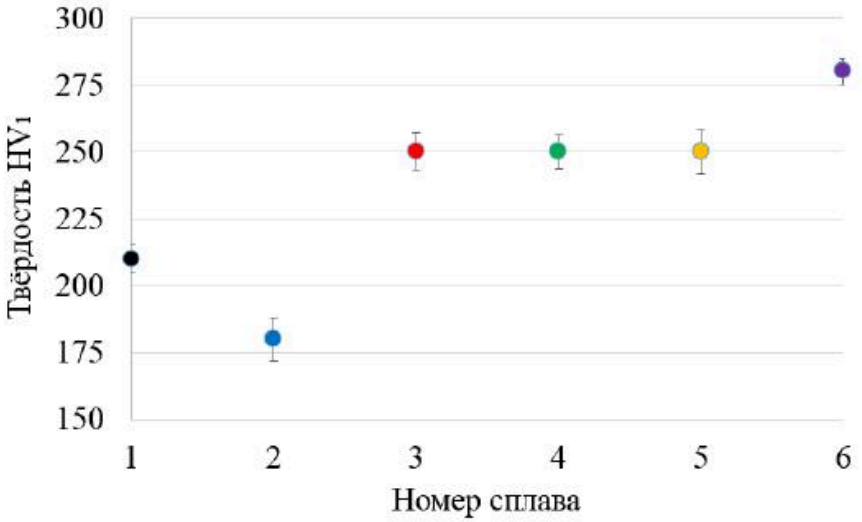
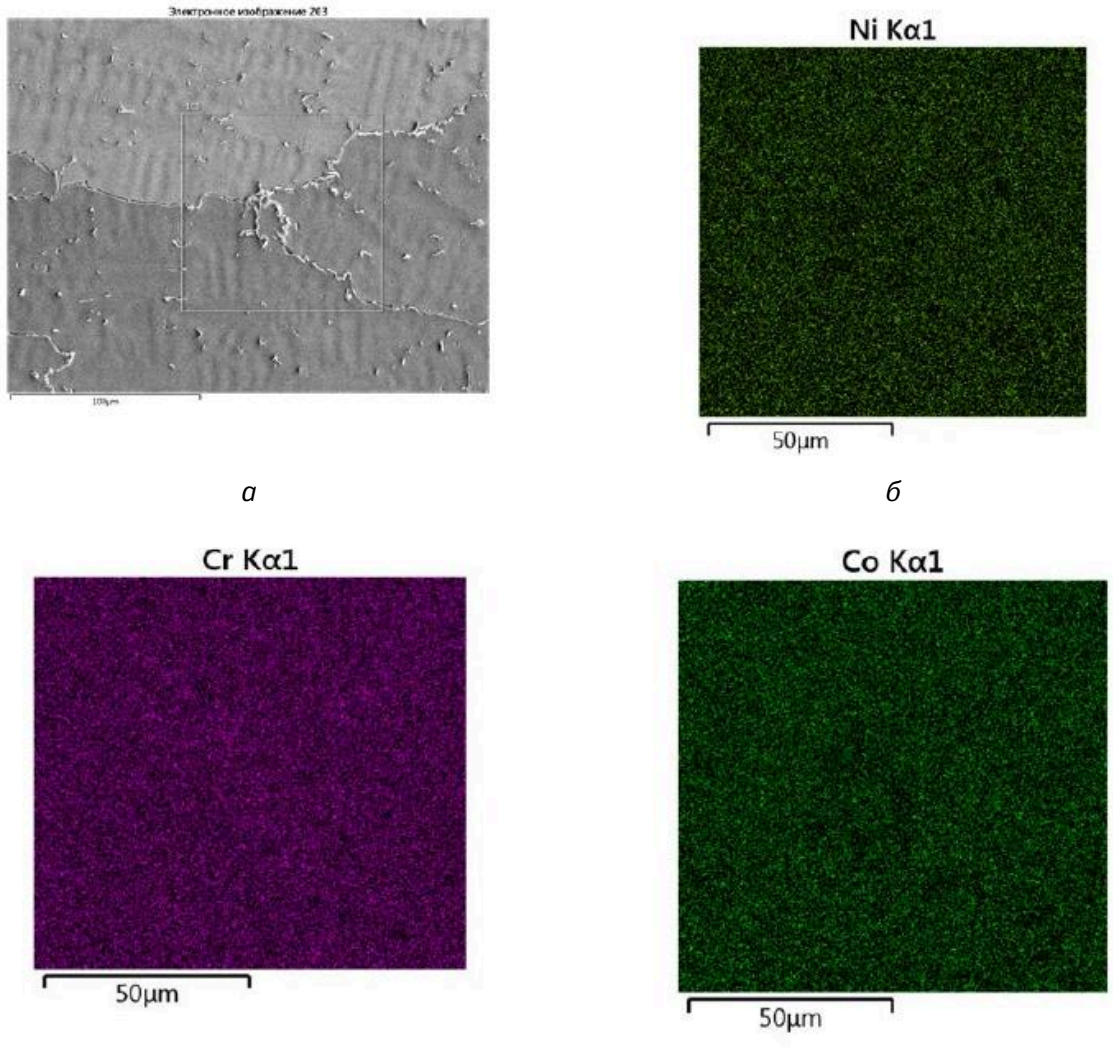


Рис. 2. Твердость энтропийных сплавов на базе системы Ni-Co-Cr в литом состоянии



а *б*

в *г*

Рис. 3. Электронное изображение микроструктуры энтропийного сплава на базе системы легирования NiCoCrWNbAlTiCRe (*а*, х500) и энергодисперсионные карты элементов:
б — Ni; *в* — Cr; *г* — Co

Перед испытаниями на изнашивание были проведены измерения твердости образцов. По результатам измерений было установлено, что энтропийный сплав в эквимассовом состоянии (1) имеет твердость выше на 10 % по сравнению с эквиатомным сплавом (2). Введение дополнительных легирующих элементов в эквиатомное соотношение позволило увеличить твердость сплавов NiCoCrWNbAlTiReC (3) и NiCoCrWNbAlTiTaC с содержанием тантала 1, 1,5 и 3 масс. % (4…6) на 20…45 % по сравнению с эквиатомным сплавом $Ni_{33}Co_{33}Cr_{33}$.

Обсуждение полученных результатов. По результатам энергодисперсионного картирования участка стыка границ зерен было установлено (рис. 2), что распределение основных компонентов Ni-Co-Cr в структуре произошло равномерно без химического взаимодействия с другими компонентами системы. Избыточными фазами в теле и по границам зерен в данном случае являются комплексные карбиды (Nb, Ti)C (рис. 3).

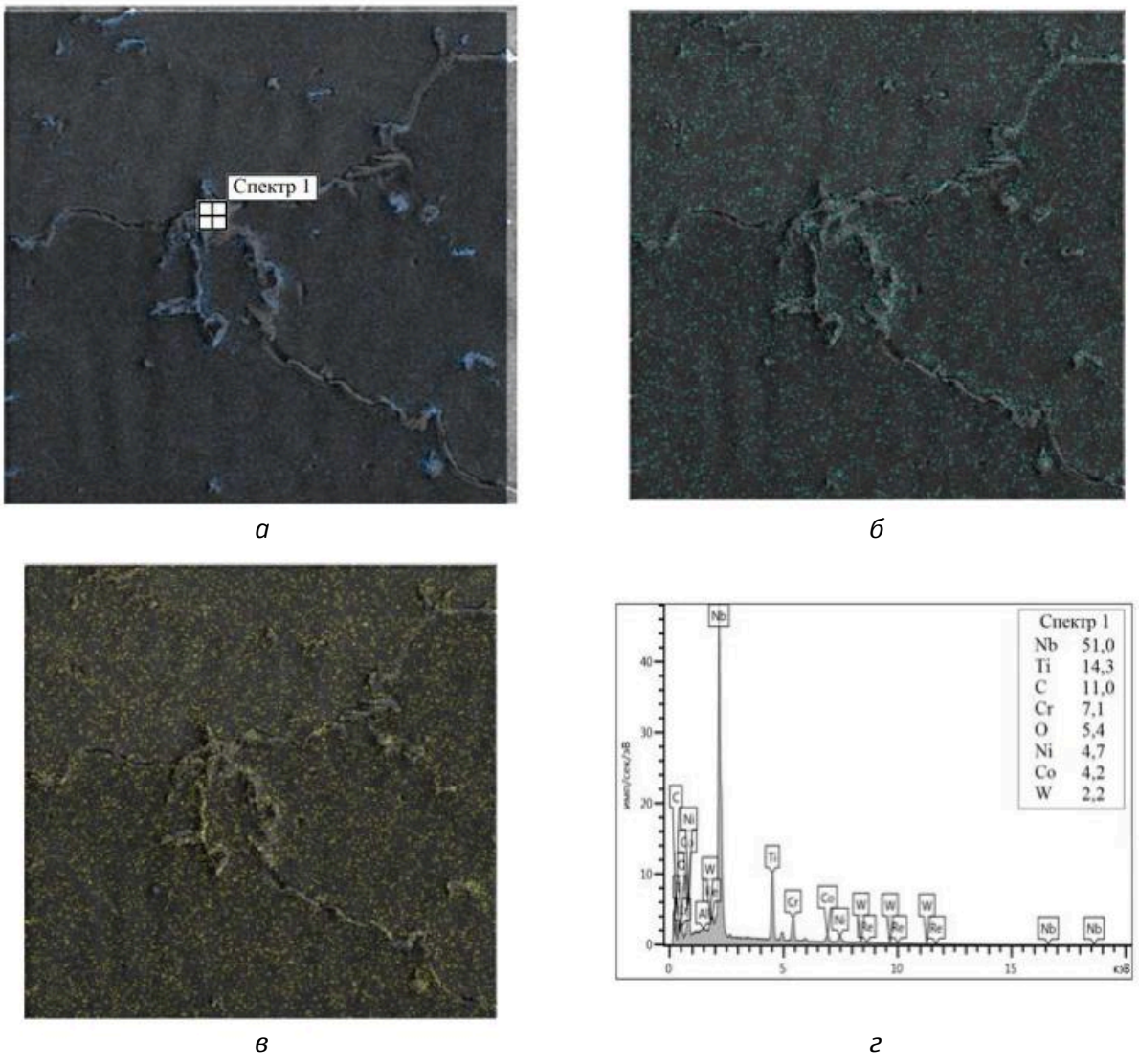
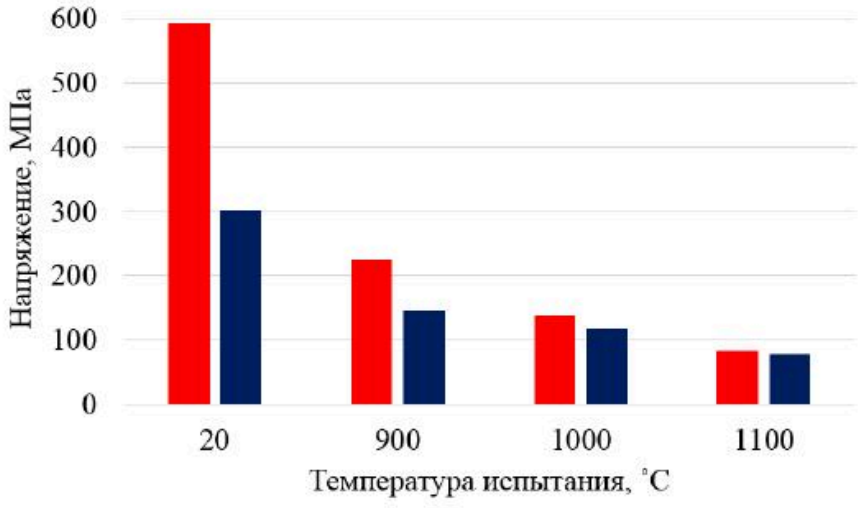
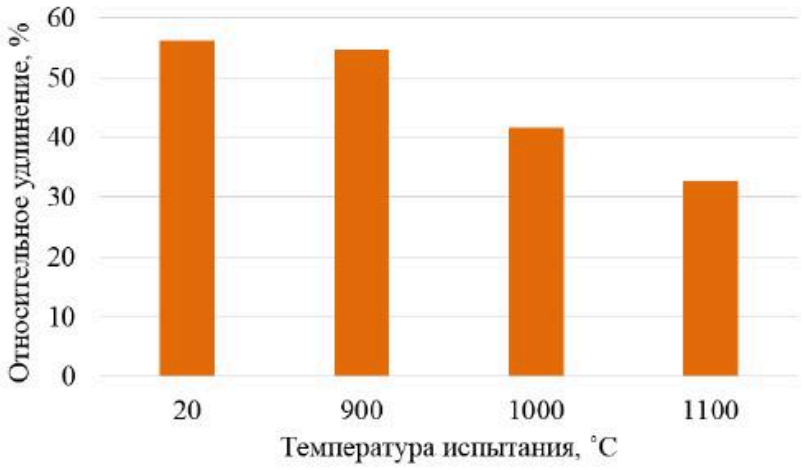


Рис. 4. Элементное энергодисперсионной картирование участка структуры по элементам C (*а*), Nb (*б*), Ti (*в*) и характеристическое рентгеновское излучение спектра комплексного карбида (Nb,Ti)C

По результатам испытаний было установлено, что с увеличением температуры испытания происходит снижение уровня прочностных характеристик (рис. 4), и, в конечном итоге предел прочности и предел текучести становятся практически равны (рис. 5, *а*). При этом относительное удлинение также начинает снижаться в температурном диапазоне 900…1100 °С (рис. 5, *б*), что косвенно свидетельствует о протекании структурно-фазовых превращений в данном интервале температур.



а



б

Рис. 5. Механические свойства энтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC после различных температур испытания на статическое растяжение:
а — предел прочности $\sigma_в$ ( ) и предел текучести $\sigma_{0,2}$ ( ); *б* — относительное удлинение δ ( )

Заключение. В современном машиностроении наблюдается высокий интерес к разработке новых классов материалов — высокоэнтропийных сплавов. Благодаря формируемой структуре с соотношением основных компонентов в эквиатомном содержании происходит реализация уникального комплекса характеристик.

В рамках данной работы были проведены исследования энтропийных сплавов в различных состояниях, определены триботехнические свойства для всех сплавов и механические свойства при различных температурах для сплава NiCoCrWNbAlTiReC. Было установлено, что износостойкость сплавов не напрямую зависит от формируемой твердости, в большей степени от степени повреждаемости поверхности.

Список источников

[1] Singh S., Wanderka N., Glatzel U., Banhart J. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi highentropy alloy. Acta Materialia, 2011, vol. 59, pp. 182–190. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.09.023

[2] Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. Materials Science and Engineering: A, 2004, vol. 375–377, pp. 213–218. https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257

[3] Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys. Entropy, 2014, vol. 16, no. 9, pp. 4749–4768.

[4] Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J. et al. Nanostructured highentropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes. Advanced Engineering Materials, 2004, vol. 6, pp. 299–303. https://doi.org/10.1002/adem.200300567

[5] Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys. Annales de Chimie-Science des Materiaux, 2006, vol. 31, pp. 633–648. https://doi.org/10.3166/acsm.31.633-648