УДК 669.72

***Артур Вилевич Ганеев[1*], Руслан Камилович Нафиков[1], Нейля Айратовна Хайбулина[1], Руслан Зуфарович Валиев[1], Елена Геннадьевна Астафурова[2]***
[1]Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия
[2]Институт физики прочности и материаловедения, г. Томск, Россия
[*]*artur_ganeev@mail.ru,*

# ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИХ ОБРАБОТОК НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА КАНТОРА FEMNCRNICO, ЛЕГИРОВАННОГО АТОМАМИ УГЛЕРОДА И АЗОТА

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС), такие как сплав Кантора (CoCrFeMnNi), привлекают значительное внимание благодаря своим уникальным механическим свойствам, включая высокую прочность, пластичность и ударную вязкость при низких температурах. Их гранецентрированная кубическая (ГЦК) решетка обеспечивает сочетание прочности и пластичности, что делает эти материалы перспективными для применения в экстремальных условиях эксплуатации [1, 2]. Легирование ВЭС элементами внедрения, такими как углерод и азот, позволяет целенаправленно модифицировать их структуру и свойства. Углерод, внедряясь в междоузлия ГЦК решетки, вызывает значительные искажения, которые способствуют твердорастворному упрочнению. Кроме того, углерод склонен к образованию карбидных фаз, таких как M23C6 и M7C3, которые также вносят вклад в повышение прочности [3, 4]. Азот, в свою очередь, улучшает пластичность за счет уменьшения размера зерна, повышения деформационного упрочнения, а также улучшает усталостные свойства. В отличие от углерода, азот меньше склонен к формированию вторичных фаз, что позволяет сохранить однородную структуру материала [5, 6]. В рамках исследования механические свойства и структура сплава Кантора, легированного углеродом (1,1 вес. %, 2.8% вес. %) и азотом (0,1 ат. %, 0,2 ат. %), изучались после интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) при 20 °C и 300 °C.

*Ключевые слова:* высокоэнтропийный сплав, сплав Кантора, интенсивная пластическая деформация кручением, углерод, азот, механические свойства.

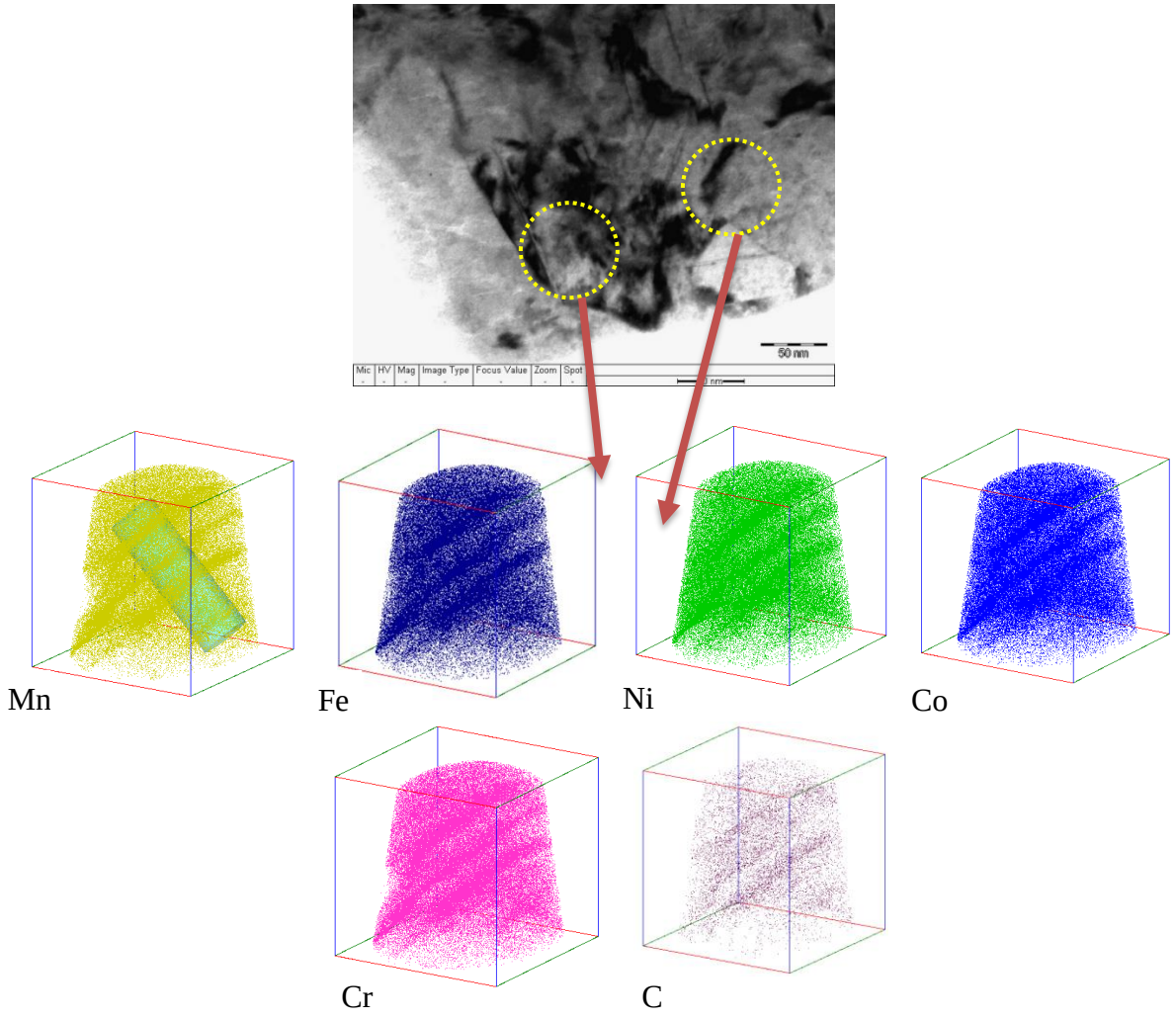
***Artur V. Ganeev, Ruslan K. Nafikov, Neylya A. Khaibulina, Ruslan Z.Valiev, Elena G. Astafurova***

# INFLUENCE OF DEFORMATIONAL-THERMAL TREATMENTS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE FeMnCrNiCo CANTOR HIGH-ENTROPY ALLOY ALLOYED WITH CARBON AND NITROGEN

© Ганеев А. В., Нафиков Р. К., Хайбулина Н. А., Валиев Р. З., Астафурова Е. Г.

High-entropy alloys (HEAs), such as the Cantor alloy (CoCrFeMnNi), attract significant attention due to their unique mechanical properties, including high strength, ductility, and impact toughness at low temperatures. Their face-centered cubic (FCC) lattice provides a combination of strength and ductility, making these materials promising for applications in extreme operating conditions [1, 2]. Alloying HEAs with interstitial elements, such as carbon and nitrogen, allows for targeted modification of their structure and properties. Carbon, when incorporated into the interstitial sites of the FCC lattice, induces significant distortions that contribute to solid-solution strengthening. Additionally, carbon tends to form carbide phases, such as M23C6 and M7C3, which also contribute to increased strength [3, 4]. Nitrogen, on the other hand, improves ductility by reducing grain size, enhancing strain hardening, and improving fatigue properties. Unlike carbon, nitrogen is less prone to the formation of secondary phases, helping to maintain a homogeneous structure of the material [5, 6]. In the study, the mechanical properties and structure of the Cantor alloy alloyed with carbon (1.1 wt.%, 2.8 wt.%) and nitrogen (0.1 at.%, 0.2 at.%) were investigated after intense plastic deformation by torsion (IPDT) at 20 °C and 300 °C.

*Key words:* high-entropy alloy, Cantor alloy, intense plastic deformation by torsion, carbon, nitrogen, mechanical properties.




*a*

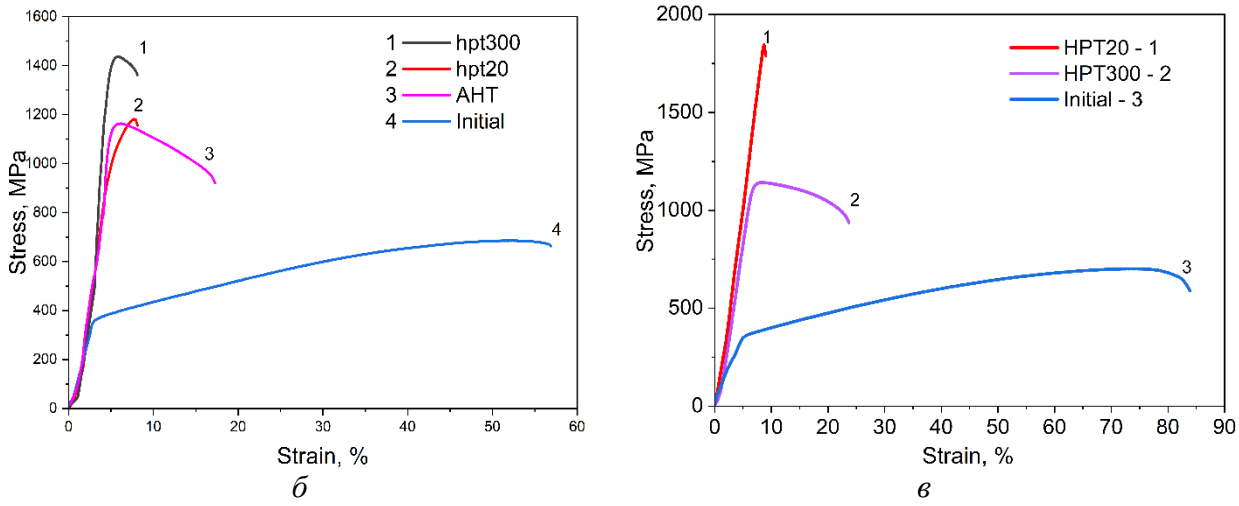



Рис. *а* – Особенности микроструктуры сплава CoCrFeNiMn после комбинированной обработки прокаткой и ИПДК при 300°, светлое поле, ПЭМ и распределение атомов элементов, полученное методом трёхмерной атомно-зондовой томографии; *б* – кривые после растяжения при комнатной температуре сплава 1С исходного состояния, после ИПДК при 20°С и ИПДК при 300°С; *в* – Р кривые после растяжения при комнатной температуре сплава 0.1N, 0.2N исходного состояния, после ИПДК при 20°С и ИПДК при 300°С

В данном исследовании были исследованы механические свойства и структура высокоэнтропийного сплава Кантора (CoCrFeMnNi), легированного углеродом (1,1 вес. %, 2.8% вес. %) и азотом (0,1 ат. %, 0,2 ат. %), с целью повышения прочности при сохранении приемлемой пластичности. Особое внимание уделялось влиянию интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) при температурах 20 °С и 300 °С на микроструктуру, фазовый состав и механические свойства сплавов.

Для изучения распределения элементов в легированном состоянии 1С применялся метод трёхмерной атомно-зондовой томографии (АРТ). Анализ показал, что элементы распределены в виде параллельных полос с расстоянием между ними около 5 нм. Такие полосы, наблюдаемые на АРТ, могут быть связаны с двойниковыми границами или границами зерен под наклоном. Также было обнаружено обогащение хромом определённых областей, предположительно связанных с образованием карбидов ($Cr_7C_3$, $Cr_{23}C_6$). Углерод, сегрегирующий на границах зерен, способствует повышению прочности материала, но снижает пластичность. Для стабилизации структуры и контроля выделения карбидов планируется применение соответствующих термических обработок.

Интенсивная пластическая деформация сплава Кантора (CoCrFeMnNi), легированного углеродом (1,1% и 2,8%) и азотом (0,1% и 1,4%), приводит к формированию наноразмерной структуры (10–50 нм) за счёт активизации процессов двойникования и влияния легирующих элементов. Наблюдаются нанодвойники, обусловленные низкой энергией дефекта упаковки, что обеспечивает значительное упрочнение материала. Средняя микротвёрдость образцов достигает 450 HV (1С) и 680 HV (3С) при НРТ=20°С, а также 570 HV

(0,1N) и 520 HV (0,2N) при HPT=300°C. Результаты механических испытаний показали предел текучести 1100–1200 МПа у 1C и 3C при HPT=20°C, 1300–1400 МПа при HPT=300°C, 1400–1900 МПа у 0,1N и 0,2N при HPT=20°C, и 1200–1500 МПа у 0,1N и 0,2N при HPT=300°C, при этом пластичность остаётся низкой. Легирование углеродом усиливает прочностные характеристики за счёт твердорастворного упрочнения и карбидообразования, а добавление азота улучшает пластичность благодаря двойникованию, что делает такие сплавы перспективными для использования в условиях повышенных механических нагрузок.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (22-19-00445)*

REFERENCES

1. Yeh J.W. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes / J.W. Yeh [et al] // Advanced Engineering Materials 2004. V. 6(5). P. 299–303.
2. Cantor B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys / B. Cantor [et al] // Materials Science and Engineering: A. 2004. V. 375–377. P. 213–218.
3. Gludovatz B. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications / B. Gludovatz [et al] // Science. 2014. V. 345(6201). P. 1153–1158.
4. Miracle D.B. A critical review of high entropy alloys and related concepts / D.B. Miracle, O.N. Senkov // Acta Materialia. 2017. V. 122. P. 448–511.
5. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys / E.P. George, D. Raabe, R.O. Ritchie // Nature Reviews Materials. 2019. V. 4. P. 515–534.
6. Traversier M. Nitrogen-induced hardening in an austenitic CrFeMnNi high-entropy alloy (HEA) / M. Traversier [et al] // Materials Science and Engineering: A. 2021. V. 804. Art. № 140725.