

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДА НА МИКРОСТРУКТУРУ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА FeMnCrNiCo**

<sup>1</sup>Реунова К.А., <sup>1</sup>Астафурова Е.Г., <sup>1</sup>Астафуров С.В., <sup>1</sup>Мельников Е.В.,  
<sup>1</sup>Панченко М.Ю., <sup>2</sup>Астапов Д.О.

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

В настоящей работе методами рентгеноструктурного анализа, металлографии, растровой и просвечивающей электронной микроскопии, а также методом одноосного статического растяжения была исследована микроструктура, фазовый состав, температурная зависимость механических свойств и характера разрушения высокоэнтропийного сплава Кантора (FeMnCrNiCo), легированного атомами углерода. Слитки химического состава Fe<sub>19,9</sub>Mn<sub>19,9</sub>Cr<sub>20,0</sub>Ni<sub>20,0</sub>Co<sub>20,2</sub> (ат. %, ВЭС-0С), Fe<sub>19,9</sub>Mn<sub>20,0</sub>Cr<sub>20,0</sub>Ni<sub>20,0</sub>Co<sub>19,0</sub>C<sub>1,1</sub> (ВЭС-1С) и Fe<sub>19,9</sub>Mn<sub>20,0</sub>Cr<sub>20,0</sub>Ni<sub>20,0</sub>Co<sub>17,3</sub>C<sub>2,8</sub> (ВЭС-3С) были выплавлены в вакуумной индукционной печи в атмосфере аргона. Для достижения однородного состояния все исследуемые сплавы были подвергнуты термомеханической обработке (ТМО): отжиг при T=1200°C, 2 ч., прокатка при комнатной температуре, отжиг при T=1200°C в течение 2 ч., закалка в воду – для сплава ВЭС-0С; выдержка при температуре 1200°C, горячая ковка на воздухе при начальной температуре 1230°C (до 60 % осадки), выдержка при температуре 1200°C, холодная прокатка при комнатной температуре (до общей степени осадки 80 %) и финальный отжиг при температуре 1200°C в течение 1-го часа с последующей закалкой в воду для сплавов ВЭС-1С и ВЭС-3С. Исследование температурной зависимости механических свойств проводилось в интервале температур от 77 до 473 К при испытаниях на одноосное статическое растяжение образцов, имеющих форму двойных лопаток с размерами рабочей части 12×2,6×1,4 мм<sup>3</sup>.

Анализ фазового состава исследуемых сплавов показал, что независимо от химического состава все ВЭСы имеют однофазную аустенитную ГЦК-структуру. Легирование углеродом способствует увеличению параметра кристаллической решетки *a*: от 0,3598 нм в случае сплава ВЭС-0С до 0,3611 для ВЭС-1С. Увеличение концентрации углерода до 3 ат. % в сплаве Кантора не оказывает существенного влияния на параметр решетки сплава (*a*=0,3612 нм) относительно ВЭС-1С. В сплаве ВЭС-1С никаких иных фаз кроме аустенитной, и никаких зернограничных выделений обнаружено не было. Увеличение атомной концентрации углерода до 3 ат. % способствует формированию крупных некогерентных сферических частиц (карбидов типа M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> и M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>).

Изучение температурной зависимости механических свойств показало, что все исследуемые сплавы обладают сильной температурной зависимостью величин условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$ , предела прочности  $\sigma_B$  и удлинения до разрушения  $\delta$ . Установлено, что исходный сплав ВЭС-0С обладает максимальными значениями прочности и пластичности  $\sigma_{0,2}$  и  $\delta$  при T=77 К ( $\sigma_{0,2}$ =385 МПа,  $\sigma_B$ =950 МПа и  $\delta$ =97 %). С увеличением температуры испытания вплоть до 483 К происходит снижение пластичности ( $\delta$ =53 %) и уменьшение значения предела текучести до 130 МПа (на 255 МПа) при T=473 К. Стоит подчеркнуть, что несмотря на общую тенденцию к снижению значений механических свойств, сплав Кантора обладает хорошим запасом прочности и пластичности во всем исследуемом температурном интервале (от 77 до 473 К).

Легирование сплава ВЭС-0С углеродом с концентрацией 1 ат. % приводит к существенному росту величины  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_B$  во всем исследуемом интервале температур. Максимальные значения  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_B$  наблюдаются при T=77 К, они составляют 720 и 1320 МПа, соответственно. Повышение температуры до 473 К сопровождается понижением величины предела текучести и предела прочности ( $\sigma_{0,2}$ =280 МПа и  $\sigma_B$ =730 МПа). Величина удлинения до разрушения  $\delta$  изменяется от 62 % при 77 К до 47 % при T=473 К.

Увеличение концентрации углерода в сплаве Кантора до 3 ат. % способствует приросту

величины  $\sigma_{0,2}$  (830 МПа) при температуре жидкого азота по сравнению со сплавом ВЭС-1С. Предел текучести уменьшается до  $\sigma_{0,2}=315$  МПа при  $T=473$  К. Стоит отметить, что по сравнению со сплавами ВЭС-0С и ВЭС-1С, сплав с 3 ат. % углерода обладает наименьшей величиной удлинения до разрушения  $\delta$ , которое слабо зависит от температуры и изменяется от 30 до 40 % в интервале температур 77-473 К, соответственно.

Легирование углеродом не оказывает влияния на форму диаграмм растяжения. Их стадийность не изменяется с температурой испытания. Установлено, что коэффициент деформационного упрочнения при одноосном статическом растяжении увеличивается с понижением температуры испытания и ростом атомной концентрации углерода в сплаве Кантора. Подобная зависимость коэффициента деформационного упрочнения от температуры испытания и от химического состава в исследуемых сплавах определяется их микроструктурой. Исследование дислокационной структуры сплава Кантора после испытаний на растяжение до разрушения показало, что основным механизмом деформации является дислокационное скольжение. Анализ микроструктуры сплавов ВЭС-1С и ВЭС-3С, полученный методом ПЭМ, свидетельствует о том, что легирование сплава Кантора углеродом с концентрацией 1 и 3 ат. % не оказывает влияния на механизм деформации, а увеличение деформационного упрочнения при понижении температуры вызвано усилением планарности дислокационной структуры.

Анализ поверхностей разрушения исследуемых сплавов после испытаний на разрушение при температурах 77 и 297 К показывает, что независимо от температуры испытания сплавы ВЭС-0С и ВЭС-1С характеризуются вязким транскристаллитным характером разрушения: на поверхностях излома наблюдаются многочисленные ямки. Добавление 3 ат. % углерода не оказывает существенного влияния на механизм разрушения, однако, в отличие от исходного сплава и сплава с малой концентрацией углерода, в сплаве ВЭС-3С на поверхностях разрушения были обнаружены крупные частицы карбидов, расположенные в ямках излома. Экспериментально установлено, что наблюдаемые частицы разрушаются хрупко в процессе пластического течения, но они практически не влияют на микромеханизм разрушения углеродистого сплава.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00261). Исследования проведены с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» (ИФПМ СО РАН, Томск).*