

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ВЫСОКОАЗОТИСТОЙ Cr-Mn-N СТАЛИ ПРИ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ И КРИОГЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Власов И.В., Гоморова Ю.Ф., Дерюгин Е.Е., Наркевич Н.А.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

В производстве конструкций морских платформ, подвергающихся значительным ветровым и волновым нагрузкам при низких климатических температурах, могут использоваться коррозионностойкие высокопрочные аустенитные Cr-Mn-N стали, стоимость которых существенно ниже Cr-Ni и Cr-Ni-Mo сталей [1]. Высокоазотистые стали имеют более высокую прочность в сравнении с хромоникелевыми. В них при содержании азота более 0,5 % α -мартенсит охлаждения с ОЦК решеткой не образуется. При деформировании в низкотемпературной области и криогенных температурах отмечено $\gamma \rightarrow \epsilon$ [2, 3] и $\gamma \rightarrow \alpha'$ [2–4] превращения, а по данным [5] при суммарном содержании азота и углерода, равном 0,5% мартенситные фазы отсутствуют и при холодном деформировании. Тем не менее, смена механизма разрушения с вязкого на хрупкий, при понижении температуры испытаний наблюдалась всеми авторами [2, 4, 5], как при растяжении, так и при ударном изгибе.

Анализ механизмов разрушения и механических свойств высокоазотистой стали, испытанной на растяжение, а также при ударном изгибе является предметом исследования в настоящей работе. Химический состав исследованной стали показан в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав исследованной стали

Состав	Cr	Mn	Si	Ni	C	N	P	S	Fe
вес, %	16,50	18,81	0,52	0,24	0,07	0,53	0,01	0,001	Ост.

После закалки от 1100°C в воде сталь имела однофазную аустенитную структуру со средним размером зерен 40 мкм. Образцы для определения ударной вязкости вырезали электроискровым способом толщиной 10 мм, шириной 5 мм и длиной 55 мм с V-образным надрезом и испытывали на автоматизированном копре INSTRON 450MPX согласно стандарту ASTM E 23:2007 в диапазоне температур от -196°C до 20°C со скоростью 59,4 м/с. Параллельно проводили испытания на растяжение плоских образцов сечением 1×2,5 мм и рабочей длиной 15 мм на испытательной машине INSTRON 5582 со скоростью $1,33 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.

Анализ диаграмм ударного нагружения (рис. 1) показывает, что при снижении температуры: (1) увеличивается нагрузка F_{gy} , завершающая стадию упругой деформации (стадия I), (2) уменьшается работа пластической деформации (стадия II), уменьшается работа распространения трещины (стадия III), (3) увеличивается наклон ниспадающей ветви диаграмм ударного нагружения, свидетельствующий об увеличении скорости распространения магистральной трещины.

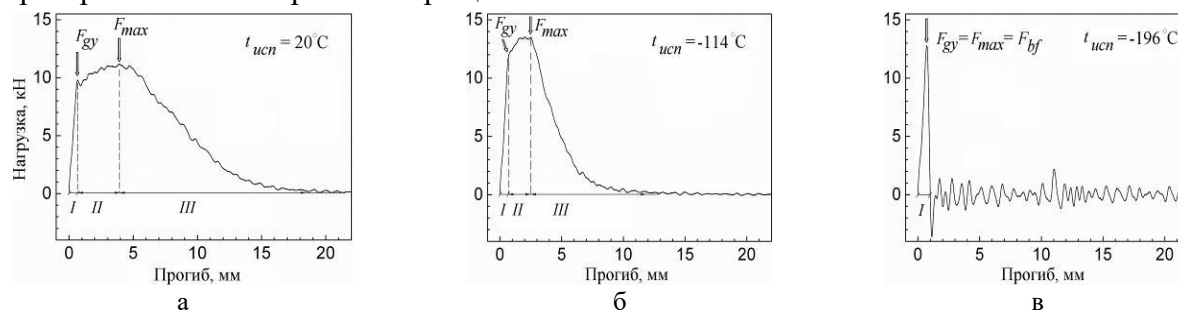


Рис. 1. Диаграммы ударного нагружения Cr-Mn-N стали, испытанной при 20°C (а), -114 °C (б) и -196 °C (в)

Диаграмма образцов, разрушенных при -196°C, отличается тем, что разрушение происходит сразу после стадии упругого прогиба, что свидетельствует об отсутствии значимой пластической деформации, то есть хрупко. Ударная вязкость $KCV^{-196^\circ\text{C}}$ ниже $KCV^{-114^\circ\text{C}}$ более, чем в 9 раз (15 и 140 Дж/см² соответственно).

На диаграммах $\sigma - \varepsilon$ (рис. 2) видно, что сталь при всех температурах испытаний на растяжение имеет протяженную стадию пластической деформации. Ранее в работе [2] было показано, что определенный вклад в немонотонный характер изменения относительного удлинения с максимумом в температурном интервале от -30°C до 0°C вносит мартенситное $\gamma \rightarrow \varepsilon$ превращение. Благодаря образованию фазы с ГПУ решеткой пластичность в этом интервале температур становится выше, чем при комнатной температуре [2].

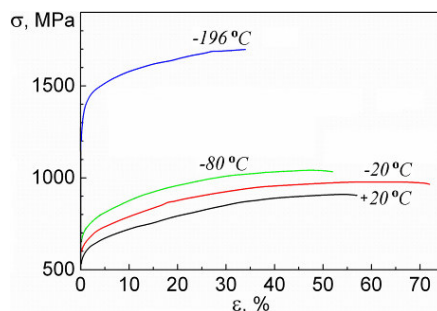


Рис. 2. Диаграммы пластического течения Cr-Mn-N стали, испытанной на растяжение при разных температурах

Несмотря на высокий уровень пластичности стали, испытанной при -196°C , в среднем 30 %, характер ее разрушения хрупкий, транскристаллитный, излом имеет слоистое строение (рис. 3а). Излом после ударного нагружения при той же температуре тоже хрупкий, однако отличается наличием порядка 10% вязкой составляющей в виде ямок и отсутствием слоистости (рис. 3б). Наблюдаются преимущественно сглаженные поверхности скола.

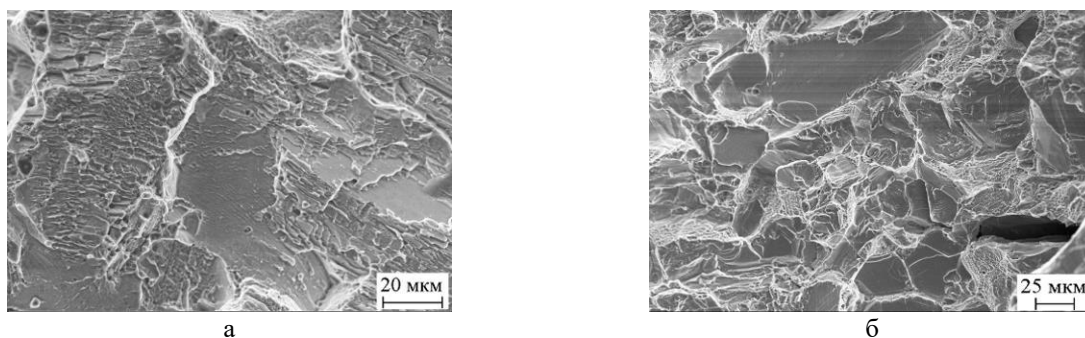


Рис. 3. Фрактограммы Cr-Mn-N стали, разрушенной при -196°C в ходе испытаний на растяжение (а) и ударный изгиб (б)

Представленные результаты свидетельствуют о сильной зависимости пластичности и вязкости разрушения, а также характера разрушения от вида испытаний и скорости нагружения. Эта зависимость, вероятно, обусловлена структурно-фазовыми превращениями, происходящими в исследуемой стали в процессе деформировании при низких температурах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-29-00438).

1. Layus P., Kah P., Martikainen J., Pirinen M., Khlushova E., Ilyin A. European and Russian metals for arctic offshore structures // Proceedings of the twenty-third international offshore and polar engineering anchorage, Alaska, USA, June 30–July 5, 2013.
2. Narkevich N., Deryugin Ye., Mironov Yu. Effect of the $\gamma \rightarrow \varepsilon$ phase transition on transformation-induced plasticity (TRIP) of nickel-free high nitrogen steel at low temperatures // Metals. 2021. V.11. № 5. 710. DOI: 10.3390/met11050710.
3. Narkevich N.A., Surikova N.S. Deformation behavior and structure evolution of stainless Cr-Mn-N steel during low temperature tension // Phys. Met. Metallogr. 2020. V.121. P. 1175–1181. DOI: 10.1134/S0031918X2012008X.
4. Xu M., Wang J., Liu C. Low temperature deformation behavior of high-nitrogen nickel-free austenitic stainless steels // Acta Metall. Sin. 2011. V. 47. № 10. P. 1335–1341. DOI: 10.3724/SP.J.1037.2011.00141.
5. Milititsky M., Matlock D.K., Regully A., Dewispelaere N., Penning J., Hanninen H. Impact toughness properties of nickel-free austenitic stainless steels // Mater. Sci. Eng.: A. 2008. V. 496. №1-2. P. 189–199. DOI:10.1016/j.msea.2008.05.022.