

# ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗОНЫ ПЛАСТИЧНОСТИ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ НА ХЛАДОСТОЙКОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Л.А. Прокопьев<sup>1\*</sup>, Я.М. Андреев<sup>1</sup>, С.О. Семёнов<sup>1</sup>, Е.С. Лукин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН», 677000, ул. Петровского, д.2, Якутск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Институт физико-технических проблем Севера им В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук, 677000, ул. Октябрьская, д.1, Якутск, Российская Федерация

\* Ответственный автор. Электронная почта: l.prokoruev@yandex.ru; Адрес для переписки: 677000, г. Якутск, ул. Петровского, д.2; Телефон: +7(4112)390501; Факс: +7(4112)390525.

Отмечены проблемы хладостойкости конструкционных сталей. Указаны недостатки современных методов определения диапазона температур эксплуатации материалов. Отмечены проблемы, которые необходимо решить для совершенствования методов оценки хладостойкости материалов. Исследована возможность количественной оценки влияния температуры на размер пластической зоны на основе данных предела текучести материала, испытанных при разных температурах. Данные о температурной зависимости предела текучести для ряда материалов экстраполированы с использованием модели термоактивируемого течения. На основе этих данных с использованием уравнений линейной механики разрушения и критерия Мизеса в качестве примера были рассчитаны приблизительные размеры пластической зоны для нескольких материалов. Расчет проводился для пяти различных материалов, для двух типов напряженного состояния: плосконапряженного и плоско-деформированного. По результатам расчетов, для алюминиевых сплавов, практически не наблюдается изменений в размерах зоны пластичности. Напротив, для стали марки «Ст.3», имеется значительное уменьшение размера зоны пластичности. Данное уменьшение зоны пластичности может стать одной из причин смены типа разрушения на хрупкий при низких температурах. В этом случае, могут быть случаи, когда при понижении температуры до определенного порога, необходимо замена критериев расчета, используемых для определения предельного состояния материала с трещиной. Предлагается использовать безразмерную величину, равную отношению размера пластической зоны при низких температурах к размеру пластической зоны при  $t=20^\circ\text{C}$ . Данный показатель позволяет количественно оценить влияние температуры на размер пластической зоны, и может быть использован как один из показателей хладостойкости материала.

В соответствии с моделью термически активируемого течения, предел текучести выражается по формуле:

$$\sigma_Y(t) = \sigma_\mu + \frac{B}{t} + \beta \cdot \lg(e)$$

$\sigma_\mu$  – атермическая компонента предела текучести,  $B$ ,  $\beta$  – коэффициенты для материала,  $e$  – скорость деформации.

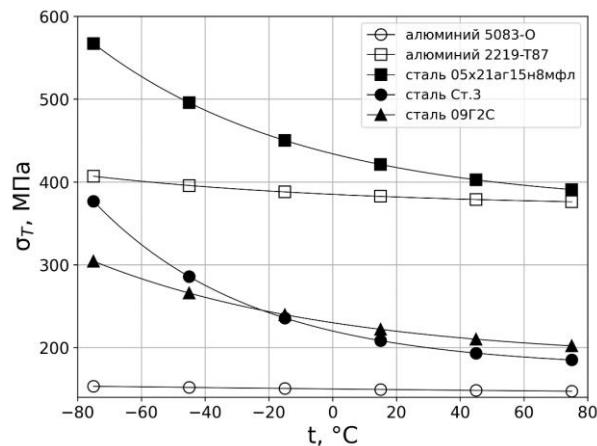


Рис. 1. Предел текучести для нескольких материалов в соответствии с моделью термически активируемого течения

В работе использованы уравнения линейной механики разрушения для описания зоны текучести у вершины трещины:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + T_{xx} \\ \sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\ \sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{cases}$$

$\sigma_{ij}$  – компоненты напряжений,  $K_I$  – коэффициент интенсивности напряжений,  $r, \theta$  – оси полярной системы координат с началом, совпадающим с вершиной трещины,  $T_{xx}$  – T-напряжения.

Для приближенной оценки формы и размеров зоны текучести у вершины трещины, использовался критерий Мизеса:

$$2\sigma_Y^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2$$

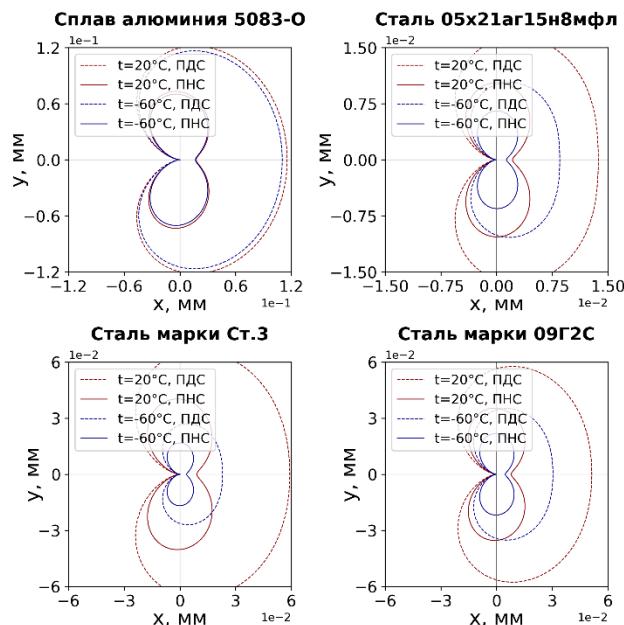


Рис. 2. Рассчитанные приближенные размеры зоны пластичности у вершины трещины при разных значениях температуры.

## Результаты

Основываясь на данных предела текучести материалов при различных температурах, проведена оценка изменения размеров зоны пластичности у вершины трещины. По результатам анализа показано, что с понижением температуры предел текучести увеличивается, что ведет к уменьшению зоны пластичности. Это, в свою очередь, может способствовать переходу от вязкого к хрупкому разрушению из-за недостаточности пластической деформации для рассеяния энергии вокруг вершины трещины.

Показано, что причиной хладноломкости материалов могут являться не только особенности кристаллического строения материала, но и основные свойства материала, такие как предел текучести материала. С точки зрения механики разрушения, при понижении температуры, для некоторых материалов значительно уменьшается размер зоны пластичности. Данное явление можно оценить расчетными методами, с использованием данных простых испытаний материалов.

Уменьшение зоны пластичности может стать одной из причин смены типа разрушения на хрупкий при низких температурах. В этом случае, могут быть случаи, когда при понижении температуры до определенного порога, необходимо замена критериев расчета, используемых для определения предельного состояния материала с трещиной.

Предложено использование безразмерной величины, равной отношению размера зоны пластичности при низких температурах к размеру зоны пластичности при  $t=20^\circ\text{C}$ . Данная величина может использоваться в качестве количественной оценки способности материала сопротивлению к развитию трещины при низких температурах.

Проведена оценка количественного изменения размера зоны пластичности при изменении температуры. Для этого, вычислен размер зоны пластичности в направлении продолжения трещины. Определена безразмерная величина, равная отношению размера зоны пластичности при низких температурах к размеру зоны пластичности при  $t=20^\circ\text{C}$ . Приведенное значение радиуса зоны пластичности, для примера, вычислено для нескольких материалов и представлено на рисунке 3:

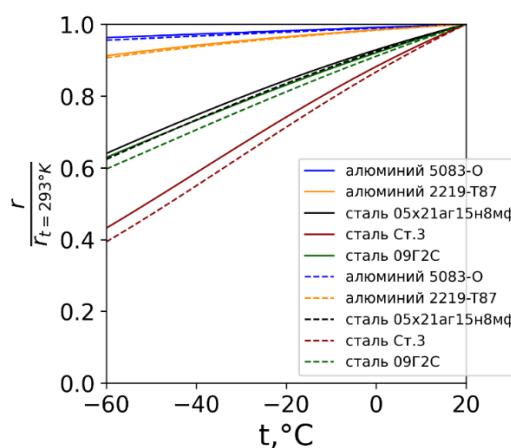


Рис. 3. График приведённых значений радиуса зоны пластичности от температуры.

## Заключение

Показано, что причиной хладноломкости материалов могут являться не только особенности кристаллического строения материала, но и основные свойства материала, такие как предел текучести материала.

Температурная зависимость предела текучести материала может являться причиной существенного уменьшения зоны пластичности при понижении температуры для некоторых материалов, вплоть до смены типа разрушения с вязкого на хрупкий.

Отношение размера зоны пластичности при низких температурах к размеру зоны пластичности при  $t=20^\circ\text{C}$  может быть использовано для количественной оценки изменения размеров зоны пластичности. Данное исследование способствует лучшему пониманию взаимосвязи между температурными условиями эксплуатации и прочностными характеристиками материалов, что особенно актуально для инженерных приложений в холодном климате и для совершенствования методов диагностики и оценки хладостойкости материалов.