

**МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА
КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПО ИХ СПОСОБНОСТИ
СОПРОТИВЛЯТЬСЯ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ
ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ**

**А. В. Шиян, к. ф.-м. н., с. н. с., С. А. Котречко, д. ф.-м. н., проф.,
Ю. Я. Мешков, д. ф.-м. н., член-корр. НАНУ, Е. Ф. Сорока, асп.,
О. П. Носенко*, к. т. н., доц., И. С. Фёдорова*, асп.**

Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,

**Государственное высшее учебное заведение*

«Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»

1. Состояние вопроса

Надежность изделий и конструкций – это способность выполнять заложенные в них функции при сохранении заданных показателей в течение времени эксплуатации. В этой связи при проектировании конструкций, а также при прогнозировании остаточного ресурса уже эксплуатируемых элементов конструкций и изделий, особую важность приобретает определение степени стабильности материала по отношению к переходу в хрупкое состояние в реальных условиях его нагружения. При этом нахождение критерия и разработка методов оптимизации базовых механических свойств конструкционных металлических сплавов особенно необходимы в настоящее время, так как их ранжировка на качественном уровне является практической задачей, актуальность которой имеет первостепенное значение в связи с глобальной тенденцией к повышению прочности конструкционных материалов за счет улучшения их качества.

Существующая в настоящее время методология классификации конструкционных сталей (КС) по качеству [1–3], является весьма общей и не отражает особенностей работы металла в конструкции. Классификация сплавов по структуре, составу, назначению, прочности и др. является в некоторых случаях также слишком общей, а иногда (например, по назначению и по прочности) просто условной [3]. Однако главным недостатком общепринятых классификационных признаков и характеристик является отсутствие количественной оценки важнейшего свойства металла, обеспечивающего его эксплуатационную надежность в конструкции, – сопротивляемости переходу в хрупкое состояние. Поэтому метод анализа конструкционных материалов с позиции оценки их качества должен быть в большей степени детализирован и иметь количественную оценку.

В работах [4; 5] были предприняты попытки количественной оценки качества трубных сталей с использованием так называемого критерия «предельного состояния металла» (ПСМ), который определялся в условиях одноосного растяжения как среднее геометрическое от «относительной трещиностойкости» (относительный уровень уменьшения упругой энергии пружинения (разгрузки) при растяжении образца до его разрушения) и «среднего удлинения в шейке образца» (относительная величина изменения

длины образца в интервале нагружения непосредственно перед разрывом и после снятия нагрузки перед появлением «шейки»). В указанных работах сделан вывод о том, что критерий ПСМ «... более полно характеризует металл по сравнению с условным его удлинением по существующим стандартам...» и даже сделана попытка с его помощью расположить металлы по условному уровню хрупкости и пластичности. По мнению авторов [4; 5] такой подход может быть использован для повышения надежности труб и металлоконструкций из них. Следует заметить, что относительную простоту этого метода и преимущество по сравнению с методом оценки качества металла по показателю относительного удлинения образца (δ_5, δ_{10}) следует отнести к его положительным сторонам, однако такой подход не имеет достаточно веского физического обоснования, так как ни параметр «относительной трещиностойкости», ни величина «среднего удлинения в шейке образца» не являются характеристиками, отражающими процесс хрупкого разрушения металла в достаточной для практических целей мере. Альтернативой упомянутым характеристикам является физически обоснованная концепция силовой надежности металла в виде характеристики механической стабильности K_{ms} , отражающей степень его сопротивляемости переходу в хрупкое состояние под воздействием внешних факторов в количественной интерпретации [6–8]. Согласно этим работам, характеристика K_{ms} характеризует силовой интервал между двумя уровнями предельной прочности металла: σ_2 – прочностью пластичного металла при критической степени деформации e_c , равной 2 %, и хрупкой прочностью металла R_{MC} . Таким образом, характеристика механической стабильности металла K_{ms} является базовой в условиях одноосного растяжения и для КС определяется согласно зависимости [6–8]:

$$K_{ms} = \frac{R_{MC}}{\sigma_2} = \frac{R_{MC}}{\sigma_{0,2} \cdot 10^n}, \quad (1)$$

где: $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести; n – показатель деформационного упрочнения.

Что же касается применения вышеуказанного критерия ПСМ [4; 5] для расположения сталей по условным уровням хрупкости и пластичности, то каждый из параметров «относительной трещиностойкости» и «среднего удлинения в шейке образца», входящих в этот критерий, может лишь косвенно по-своему отражать склонность металла к переходу в хрупкое состояние, при этом нет никаких оснований объединять эти параметры друг с другом в виде показателя среднего геометрического. Кроме того, диапазон применения указанного способа ограничен, безусловно, важным, но относительно малым в общем объеме КС кругом сплавов, прошедших тестирование¹.

¹ В указанных работах также не приведены данные статистической обработки результатов тестирования трубных сталей с применением предлагаемого способа, позволяющие оценить его точность и применимость для других групп КС.

Анализ общепринятых принципов классификации КС по качеству [3] и результаты работы [9] позволяют обозначить соответствующие условные интервалы изменения показателей прочности $\sigma_{0,2}$, а данные работы [10] – интервалы изменения характеристики механической стабильности K_{ms} для различных групп качества, а также отметить соответствия с некоторыми другими видами классификации (таблица 1).

Таблица 1
Классификация по качеству КС при комнатной температуре испытаний (293 К)

| Группа качества стали по [3] | Признаки классификации | | | | Соответствие другим видам классификации [1–3] | |
|---------------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------|---|--|
| | Содержание S и P, % [1] | $\sigma_{0,2}$, МПа [9] | K_{ms} [10] | Маркировка по [3] | По составу | По назначению |
| Обыкновенного качества (ОК) | $\leq 0,050$ | ≤ 300 | $\geq 1,7$ | Ст. | Углеродистые | Широкого потребления; конструкционные |
| Качественная (К) | $\leq 0,035$ | > 300 ≤ 800 | $\leq 3,0$ $\geq 1,05$ | Сталь | Углеродистые; низко- и среднелегированные | Конструкционные; инструментальные |
| Высоко-качественная (ВК) | $\leq 0,025$ | ≥ 800 | $\leq 2,0$ $\geq 1,05$ | А | Углеродистые и легированные; высоколегированные | Конструкционные; инструментальные с повышенными требованиями |
| Особо высоко-качественная (ОВК) | $\leq 0,015$ | ≥ 800 | $\leq 2,0$ $\geq 1,05$ | Ш | Легированные высоко- и сложнoleгированные | Конструкционные с особыми свойствами |

Ключевым этапом первичной оценки качества КС в условиях одноосного квазистатического растяжения является оптимизация, т. е. поиск наилучших сочетаний комплекса их базовых механических свойств. Впервые вопрос оценки качества КС на основе системы взаимосвязи комплекса базовых механических свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» [11] был рассмотрен в работах [12; 13]. В указанных работах было показано, что такая взаимосвязь может быть количественно описана с помощью параболических уравнений регрессии $\psi_k = f(\sigma_{0,2})$ при условии постоянства характеристики механической стабильности K_{ms} . Однако

исследованная в [11–13] статистическая выборка КС была сравнительно мала, что не позволило выявить целый ряд особенностей зависимостей $\psi_k = f(\sigma_{0,2})$ при $K_{ms} = \text{const}$.

Разработанная в [14] методика определения характеристик хрупкой прочности R_{MC} и механической стабильности K_{ms} для широкого круга КС, а также установленная в [10] система взаимосвязи комплекса базовых механических свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» этих сплавов, позволили не только осуществлять прогнозирование степени сопротивляемости металла переходу в хрупкое состояние, но и создали предпосылки для количественной интерпретации категории качества металла на основе более полного банка данных этих свойств.

В работе [10] на основе полученных в результате обработки статистически достоверного банка данных закономерностей согласованного изменения характеристик прочности ($\sigma_{0,2}$) и пластичности (ψ_k) КС при условии постоянства уровня механической стабильности ($K_{ms} = \text{const}$) была проведена оптимизация этих свойств и построены *кривые оптимизации* для системы их взаимосвязи. Смысл таких кривых оптимизации заключается в том, что они характеризуют оптимальное (наилучшее) сочетание характеристик пластичности $\psi_K^{opt.}$ и механической стабильности $K_{ms}^{opt.}$ КС при заданной прочности $\sigma_{0,2}$. Таким образом, анализ результатов, полученных в [10], показал, что отношения величин характеристик пластичности ψ_k и механической стабильности K_{ms} к их оптимальным значениям $\psi_K^{opt.}$ и $K_{ms}^{opt.}$ на кривых оптимизации при заданной прочности $\sigma_{0,2}$ можно рассматривать как показатели качества КС. При этом сочетание характеристик $\psi_K^{opt.}$ и $K_{ms}^{opt.}$ при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$ характеризует наивысшее качество металла и дает возможность в инженерной практике выбрать или заказать такой сплав, который по своим свойствам наиболее близок к оптимальным значениям указанных механических характеристик.

Исходя из вышеизложенного, **целью настоящей работы** является разработка метода оценки качества конструкционных сталей по степени близости значений их пластичности ψ_k и механической стабильности K_{ms} к оптимальному сочетанию этих свойств в системе взаимосвязи «пластичность – прочность – механическая стабильность» при заданной прочности $\sigma_{0,2}$.

В рамках настоящей работы авторами будет представлена методика первичной оценки качества КС с использованием критерия механической стабильности K_{ms} в условиях одноосного растяжения, а развитие этой классификации для оценки служебной надежности сплавов в условиях концентрации напряжений представляет задачу дальнейших исследований.

Предлагаемые здесь подходы обладают исходными преимуществами и принципиальными отличиями, главными из которых являются следующие:

– вопрос о сопротивляемости или склонности металла к переходу из пластического (вязкого) в хрупкое состояние рассматривается в рамках концепции механической стабильности с использованием структурно

детерминированной характеристики K_{ms} , как количественной меры его служебных свойств [6–8];

– фундаментальность используемых зависимостей, основанная на статистической обработке крупномасштабного банка экспериментальных данных широкого круга КС;

– обоснованное определение границ расположения сплавов по уровням качества, объективно отражающее характер поведения их базовых механических характеристик в системе взаимосвязи «пластичность – прочность – механическая стабильность».

2. Исследуемые материалы

Материалы для исследований подбирали по принципу максимально широкого охвата различных комбинаций прочностных и пластических характеристик КС, при этом характеристики прочности изменялись в пределах от $\sigma_{0,2} = 138$ МПа до $\sigma_{0,2} = 2\ 250$ МПа, а характеристики пластичности – от $\psi_K = 86,0$ % до $\psi_K = 1,5$ %. При этом в качестве объектов анализа выбирали КС и сварные швы, относящиеся к различным классам по структуре, качеству, составу и назначению, в том числе специального назначения, используемые в криогенной технике, атомной энергетике, а также для создания особо ответственных конструкций. Исследуемые сплавы отличались режимами термической обработки, технологиями сварки и температурой испытаний в диапазоне от 77 К до 293 К. Для анализа использовали экспериментальные данные, полученные в ИМФ им. Г. В. Курдюмова НАН Украины [6; 14–16], а также справочные и литературные данные из других источников [1–3, 17–19] с целью получения информации о значениях базовых механических характеристик КТС в диапазоне температур от 77 К до 293 К, которые были обработаны при помощи методики [14]. Это позволило получить достаточный объем данных для корректной статистической обработки. Всего в настоящей работе представлены результаты обработки около 1 500 измерений комплекса механических характеристик более 400 марок КС.

3. Методика оценки качества конструкционных сталей по их способности сопротивляться переходу в хрупкое состояние

3.1. Экспресс-метод определения вида КС

В работе [10] было установлено, что параболические зависимости $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при условии $K_{ms} = \text{const}$ можно разделить на два вида в зависимости от типа экстремума. Первый вид характеризуется наличием максимумов ($\psi_K^{\text{макс.}}$, $\sigma_{0,2}^{\text{макс.}}$), а второй – наличием минимумов ($\psi_K^{\text{мин.}}$, $\sigma_{0,2}^{\text{мин.}}$) при заданных уровнях механической стабильности K_{ms} . Характерной особенностью второго вида является некоторое повышение пластичности ψ_K с увеличением прочности $\sigma_{0,2} > \sigma_{0,2}^{\text{мин.}}$ при заданном уровне K_{ms} (рис. 1).

Для первичной оценки качества КС по результатам испытаний на одноосное квазистатическое растяжение необходимо выявить его принадлежность к определенному виду, т.к. соответствующие методики

имеют свои особенности для каждого из них.

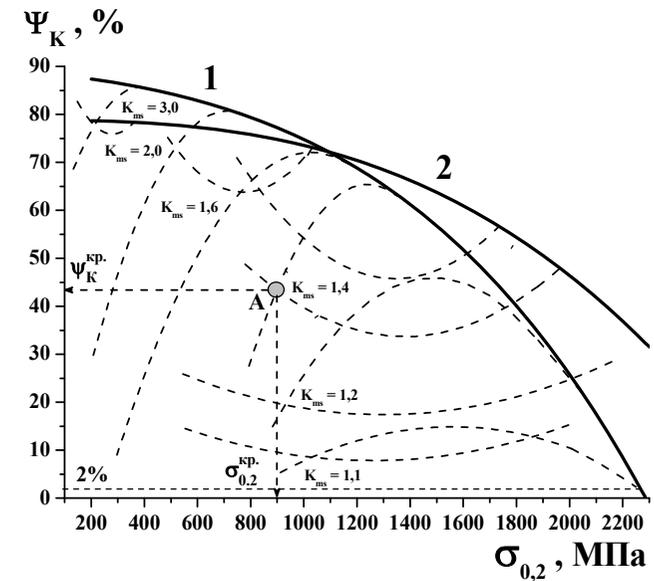
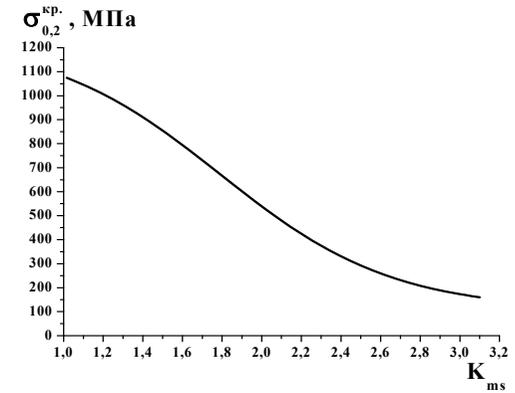


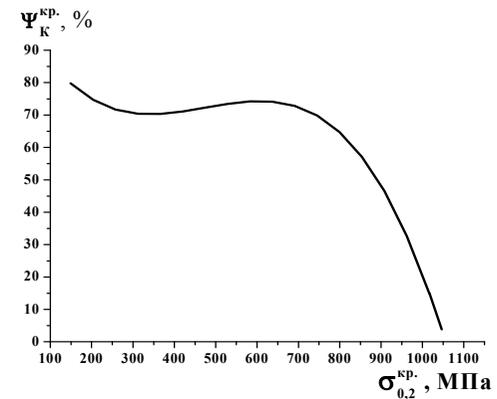
Рис. 1. Зависимости пластичности Ψ_K от прочности $\sigma_{0,2}$ для КС: 1 – кривая оптимизации для сплавов 1-го вида; 2 – то же для сплавов 2-го вида; штриховые изолинии – при некоторых фиксированных уровнях механической стабильности K_{ms} для 1-го и 2-го видов соответственно; А – точка пересечения зависимостей 1-го (выпуклая парабола) и 2-го (вогнутая парабола) видов; $\sigma_{0,2}^{kp.}$, $\Psi_K^{kp.}$ – критические значения прочности и пластичности в точке А

Методика определения вида КС основана на использовании новых характеристик критической прочности $\sigma_{0,2}^{kp.}$ и пластичности $\Psi_K^{kp.}$, определяющих прочностные и деформационные условия разделения сплавов на виды (рис. 1). Как видно из этого рисунка, особую роль для определения вида сплава играет критическая точка «А» пересечения двух парабол, в которой их вид не определен. Таким образом, характеристики прочности и пластичности принимают в точке «А» определенные критические значения $\sigma_{0,2}^{kp.}$ и $\Psi_K^{kp.}$, при этом любое изменение величины одного из этих критических параметров неминуемо приводит к изменению другого. Очевидно, что это изменение носит качественный характер: при заданной прочности $\sigma_{0,2} > \sigma_{0,2}^{kp.}$ КС разделяются на два различных по качеству вида – с повышенной или сниженной пластичностью Ψ_K при заданной прочности

$\sigma_{0,2}$, которые описываются, соответственно, выпуклой или вогнутой зависимостью $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при условии $K_{ms} = \text{const}$, а при $\sigma_{0,2} < \sigma_{0,2}^{кр.}$ имеет место обратная ситуация. В результате анализа изменения положения точки «А» при изменении фиксированных уровней механической стабильности K_{ms} , были установлены зависимости $\sigma_{0,2}^{кр.} = f(K_{ms})$ и $\psi_K^{кр.} = f(\sigma_{0,2}^{кр.})$, использование которых позволяет сформулировать указанную методику в достаточно простом и удобном для практического применения виде (рис. 2).



а



б

Рис. 2. Зависимости для КС: а) критического значения прочности $\sigma_{0,2}^{кр.}$ от уровня механической стабильности K_{ms} ; б) критического значения пластичности $\psi_K^{кр.}$ от критического значения прочности $\sigma_{0,2}^{кр.}$. Зависимости, представленные на рисунке 2, имеют следующее

аналитическое описание: функцию $\sigma_{0,2}^{kp.} = f(K_{ms})$ можно аппроксимировать при помощи зависимости (рис. 2 а):

$$\sigma_{0,2}^{kp.} = a + \frac{b}{1 + 10^{(K_{ms}-c)}}, \text{ МПа} \quad (2)$$

где $a = 107,4$; $b = 1128,8$; $c = 1,792$ – эмпирические коэффициенты, а функцию $\psi_K^{kp.} = f(\sigma_{0,2}^{kp.})$ – при помощи кубического полинома (рис. 2 б):

$$\psi_K^{kp.} = a - b \cdot \sigma_{0,2}^{kp.} + c \cdot (\sigma_{0,2}^{kp.})^2 - d \cdot (\sigma_{0,2}^{kp.})^3, \% \quad (3)$$

где: $a = 108,168$; $b = 0,273$ [МПа⁻¹]; $c = 6,250 \cdot 10^{-4}$ [МПа⁻²]; $d = 4,390 \cdot 10^{-7}$ [МПа⁻³] – эмпирические коэффициенты.

Таким образом, можно сформулировать экспресс-метод для определения принадлежности КС к данному виду (рис. 1):

– зная величину характеристики механической стабильности K_{ms} выбранного сплава, определяют значение критической прочности $\sigma_{0,2}^{kp.}$, используя зависимость (2);

– затем определяют значение критической пластичности $\psi_K^{kp.}$, используя зависимость (3);

– наконец, определяют принадлежность сплава к определенному виду, соблюдая следующие условия: 1) если у выбранного сплава $\sigma_{0,2} > \sigma_{0,2}^{kp.}$, а $\psi_K > \psi_K^{kp.}$, то он принадлежит к 1-му виду (с повышенной пластичностью ψ_K при заданной прочности $\sigma_{0,2}$), если $\psi_K \leq \psi_K^{kp.}$, то ко 2-му виду (с пониженной пластичностью ψ_K при заданной прочности $\sigma_{0,2}$); 2) если у выбранного сплава $\sigma_{0,2} \leq \sigma_{0,2}^{kp.}$, а $\psi_K \leq \psi_K^{kp.}$, то он принадлежит к 1-му виду, если же $\psi_K > \psi_K^{kp.}$, то принадлежит ко 2-му виду.

3.2. Оценка качества при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$

Схематически метод оценки качества показан для КС 1-го вида на рисунке 3, где точкой «а» обозначены оптимальные значения свойств механической стабильности $K_{ms}^{onm.}$ и пластичности $\psi_K^{onm.}$ на кривой оптимизации 1 (рис. 1), а точкой «а*» – значения этих свойств (K_{ms} , ψ_K) у выбранного сплава при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$. Принцип такой оценки качества аналогичен для любых КС независимо от их вида.

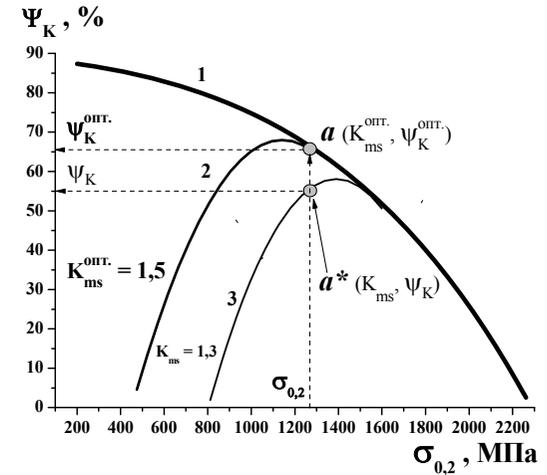


Рис. 3. Зависимости для КС 1-го вида: оптимального значения пластичности $\Psi_K^{opt.}$ от прочности $\sigma_{0,2}$ (кривая оптимизации 1); пластичности ψ_K от прочности $\sigma_{0,2}$ при условии $K_{ms} = 1,5$ для оптимизированного сплава (кривая 2); та же при условии $K_{ms} = 1,3$ для выбранного сплава (кривая 3); точка «a» с координатами $(K_{ms}^{opt.}, \Psi_K^{opt.})$, точка «a*» с координатами (K_{ms}, ψ_K) при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$

Из рисунка 3 видно, что меру близости значений свойств K_{ms} , ψ_K у выбранного сплава (точка «a*») к их оптимальным значениям $K_{ms}^{opt.}$, $\Psi_K^{opt.}$ на кривой оптимизации (точка «a») при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$ можно определить в виде следующих соотношений этих свойств:

$$\mu_{K_{ms}}^{\sigma} = \frac{K_{ms}}{K_{ms}^{opt.}}; \quad (4)$$

$$\mu_{\psi}^{\sigma} = \frac{\Psi_K}{\Psi_K^{opt.}}, \quad (5)$$

где: $\mu_{K_{ms}}^{\sigma}$ – мера оптимальности по механической стабильности, а μ_{ψ}^{σ} – мера оптимальности по пластичности при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$ [12; 13]; оптимальные значения $K_{ms}^{opt.}$ и $\Psi_K^{opt.}$ для КС определяются согласно зависимостям [10]:

– для сплавов 1-го вида:

$$K_{ms}^{onm.} = a - b \cdot \ln \left\{ 1 - c \cdot \left[d - \frac{f}{(1 + k \cdot \sigma_{0,2})^m} \right]^n \right\}, \quad (6)$$

где $a = 1,046$; $b = 0,334$; $c = 0,101$; $d = 90,855$; $f = 2,169$; $k = 5,40 \cdot 10^{-4}$ [МПа⁻¹];
 $m = -4,673$; $n = 0,514$;

$$\Psi_K^{onm.} = a - \frac{b}{(1 + c \cdot \sigma_{0,2})^d}, \quad (7)$$

где $a = 90,855$; $b = 2,169$; $c = 5,40 \cdot 10^{-4}$ [МПа⁻¹]; $d = -4,673$;
 – для сплавов 2-го вида:

$$K_{ms}^{onm.} = a \cdot \ln \left[b + \frac{c}{(1 + d \cdot \sigma_{0,2})^m} \right], \quad (8)$$

где $a = -0,392$; $b = 1,60 \cdot 10^{-4}$; $c = 1,28 \cdot 10^{-5}$; $d = 6,72 \cdot 10^{-3}$ [МПа⁻¹]; $m = -2,886$;

$$\Psi_K^{onm.} = a - \frac{b}{(1 + c \cdot \sigma_{0,2})^d}, \quad (9)$$

где $a = 78,868$; $b = 0,015$; $c = 6,72 \cdot 10^{-3}$ [МПа⁻¹]; $d = -2,886$;

a, b, c, d, f, k, m, n – эмпирические коэффициенты.

Следует отметить, что согласно концепции механической стабильности и выводам работы [12], основным «индикатором» качества, отражающим способность металла сопротивляться хрупкости в количественном измерении, является мера оптимальности по механической стабильности μ_{Kms}^σ при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$. При этом мера оптимальности по пластичности μ_ψ^σ является вспомогательным параметром для оценки качества, отражающим в количественном измерении степень близости пластичности ψ_K выбранного сплава к ее оптимальной величине $\Psi_K^{onm.}$ при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$.

Метод количественной оценки качества при заданной прочности наиболее удобен для практического применения, вследствие того, что характеристика прочности $\sigma_{0,2}$ всегда принимает участие в инженерных расчетах и технологических прогнозах – эта характеристика легко определяется экспериментально по результатам испытаний на одноосное квазистатическое растяжение, она включается в технические условия на поставку металлических конструкционных материалов, в паспорта приемочных испытаний, является наиболее привычной и легкодоступной в любых справочных источниках.

3.3. Принципы расположения КС по уровням качества

Принципы расположения КС по уровням качества и определения границ между этими уровнями отражают характер поведения их базовых механических характеристик в системе взаимосвязи «пластичность – прочность – механическая стабильность». Указанные принципы имеют некоторые различия в зависимости от вида сплава, связанные с интервалами прочности, в которых действуют определенные правила для определения уровня его качества. Общими правилами для всех исследованных сплавов независимо от их вида являются следующие:

- наличие 4-х уровней качества сплавов: ВК – высококачественные; К – качественные; УК – удовлетворительного качества; НК – низкого качества. Ниже по тексту будут использоваться указанные условные обозначения уровней качества и описаны принципы расположения сплавов по ним;

- уровень ВК имеет верхнюю и нижнюю границы, принцип построения которых заключается в определении доверительного интервала кривой оптимизации по правилу «трех сигм» [20], т. е. трехкратного отклонения выборочного стандарта функции $\psi_K^{opt.} = f(\sigma_{0,2})$ в положительную и отрицательную стороны. Такой принцип определения границ уровня ВК обеспечивает доверительную вероятность (надежность) попадания в него соответствующих по качеству сплавов $P(-3s < \delta < +3s) = 0,997$ (где: доверительный интервал ошибки δ равен $\pm 3s$; s – выборочный стандарт [20]). Здесь следует заметить, что сплавы, значения свойств которых в системе взаимосвязи « $\psi_K - \sigma_{0,2} - K_{ms}$ » выходит за пределы верхней границы уровня ВК попадают в категорию либо промахов (свойства определены с наличием систематической ошибки и т. п. – обычно исключаются из рассмотрения), либо новых перспективных технологий (ПТ);

- нижняя граница уровня ВК одновременно является верхней границей для более низких по качеству уровней (К или УК уровни);

- границей между уровнями К и УК служит либо зависимость максимального значения пластичности $\psi_K^{max.}$ от максимальной прочности $\sigma_{0,2}^{max.}$ для сплавов 1-го вида (значения $\psi_K^{max.}$ и $\sigma_{0,2}^{max.}$ в вершине выпуклой параболы), или зависимость минимального значения пластичности $\psi_K^{min.}$ от минимальной прочности $\sigma_{0,2}^{min.}$ для сплавов 2-го вида (значения $\psi_K^{min.}$ и $\sigma_{0,2}^{min.}$ в вершине вогнутой параболы) – (рис. 1) [10]. Такие зависимости для КС обоих видов представлены на рисунке 4.

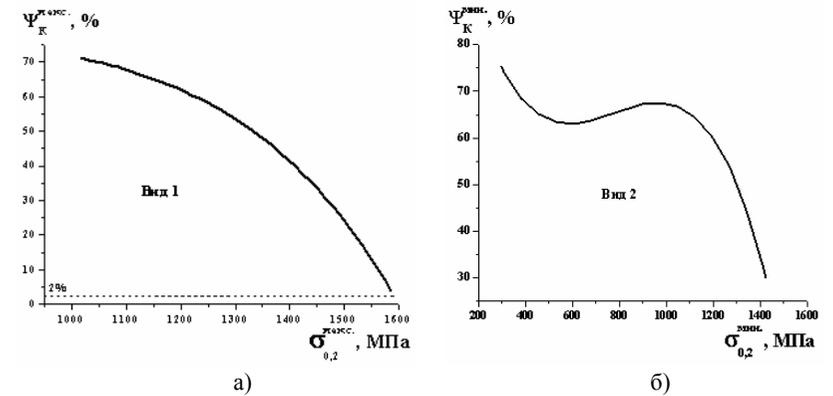


Рис. 4. Зависимости для КС: а) максимального значения пластичности $\psi_K^{\text{макс.}}$ от максимальной прочности $\sigma_{0,2}^{\text{макс.}}$ для сплавов 1-го вида; б) минимального значения пластичности $\psi_K^{\text{мин.}}$ от минимальной прочности $\sigma_{0,2}^{\text{мин.}}$ для сплавов 2-го вида

– нижней границей всей системы расположения сплавов по уровням качества служит зависимость $\psi_K^{\text{кр.}} = f(\sigma_{0,2}^{\text{кр.}})$, которая характеризует качественный переход, связанный с разделением КС на виды (рис. 2 б). Таким образом, сплавы, сочетание свойств ψ_K и K_{ms} которых при заданной прочности $\sigma_{0,2}$ в системе взаимосвязи « $\psi_K - \sigma_{0,2} - K_{\text{ms}}$ » находятся ниже верхней границы уровня НК попадают в категорию некачественных и не рекомендуются к применению в конструкциях ответственного назначения.

Ниже будет дано обоснование и аналитическое описание принципов расположения исследованной выборки КС обоих видов по уровням качества.

4. Анализ результатов оценки качества КС

Диаграмма расположения КС 1-го вида по уровням качества приведена на рисунке 5. На диаграмме отражены общие принципы определения уровней качества, границ между ними и некоторые особенности, свойственные для этого вида сплавов, а именно:

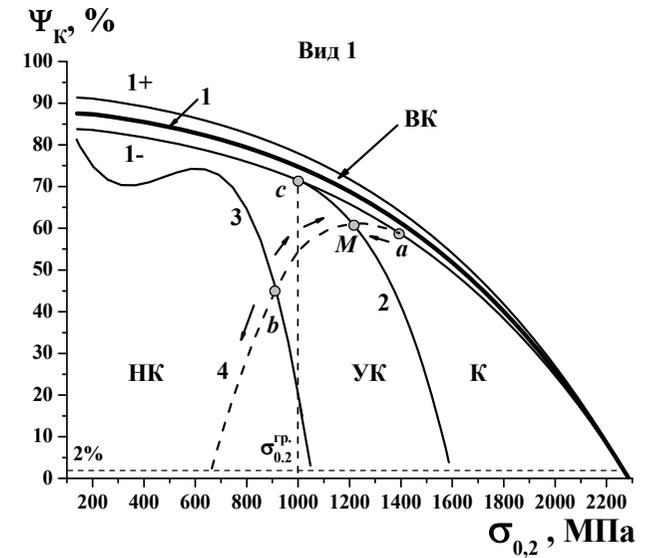


Рис. 5. Диаграмма расположения КС 1-го вида по уровням качества: ВК, К, УК, НК – уровни качества; зависимость оптимального значения пластичности Ψ_K^{opt} от прочности $\sigma_{0,2}$ (кривая оптимизации 1); верхняя граница уровня ВК (кривая 1+); нижняя граница уровня ВК (кривая 1-); зависимость максимальной пластичности Ψ_K^{max} от максимальной прочности $\sigma_{0,2}^{max}$ в точках максимумов выпуклых зависимостей $\psi_k = f(\sigma_{0,2})$ при $K_{ms} = const$ (кривая 2); зависимость критического значения пластичности Ψ_K^{cp} от критического значения прочности $\sigma_{0,2}^{cp}$ (кривая 3); зависимость пластичности Ψ_K от прочности $\sigma_{0,2}$ при $K_{ms} = const$ (кривая 4); точки пересечения кривых: a – 1- и 4; M – 2 и 4; b – 3 и 4; c – 1- и 2 при $\sigma_{0,2}^{gp}$; $\sigma_{0,2}^{gp}$ – граничная прочность

– уровень качества ВК имеет место во всем исследованном интервале свойств в системе взаимосвязи «пластичность – прочность – механическая стабильность», однако доверительный интервал границ этого уровня по показателю пластичности ψ_k уменьшается по мере повышения прочности $\sigma_{0,2}$ и снижения уровня механической стабильности K_{ms} , обеспечивая при этом все более «жесткие» условия для достижения сочетания значений свойств ψ_k и K_{ms} металла, максимально близких к оптимальным. Таким образом, уровень

ВК характеризуется наивысшими показателями качества сплавов, при этом верхняя и нижняя границы уровня ВК (рис. 5 – кривые 1+ и 1-) описываются зависимостью, производной от (7):

$$\Psi_K^{1+,1-} = \pm 3 \cdot s \cdot \left[a - \frac{b}{(1 + c \cdot \sigma_{0,2})^d} \right], \quad (10)$$

где: $s = 1,44$ – выборочный стандарт для КС 1-го вида [10]; знак «+» для верхней, знак «-» – для нижней границы уровня ВК; a, b, c, d – эмпирические коэффициенты, входящие в (7).

– уровень качества K имеет ограничение по прочности $\sigma_{0,2}^{sp.} = 1\ 000$ МПа и, таким образом, характерен только для высокопрочных КС при $\sigma_{0,2} > \sigma_{0,2}^{sp.}$.

Это ограничение связано с тем, что точка максимума «М» ($\Psi_K^{макс.}, \sigma_{0,2}^{макс.}$) зависимости $\psi_k = f(\sigma_{0,2})$ при условии $K_{ms} = const$ практически совпадает с кривой оптимизации уже на уровне механической стабильности $K_{ms} = 1,7$, а это, в свою очередь, приводит к пересечению зависимости $\Psi_K^{макс.} = f(\sigma_{0,2}^{макс.})$ с нижней границей уровня качества ВК (рис. 5 – точка «с» на пересечении кривых 2 и 1-) при достижении граничной прочности $\sigma_{0,2}^{sp.} = 1\ 000$ МПа. Таким образом, уровень качества K характеризуется повышением пластичности сплава Ψ_K до уровня $\Psi_K^{макс.}$ при некотором снижении его прочности $\sigma_{0,2}$ до уровня $\sigma_{0,2}^{макс.}$ (см. рис. 5 – интервал изменения свойств $\psi_k, \sigma_{0,2}$ от точки «а» к точке максимума «М», что отмечено стрелкой на кривой 4). Верхняя граница уровня качества K по определению совпадает с нижней границей уровня ВК, а нижняя представляет собой зависимость $\Psi_K^{макс.} = f(\sigma_{0,2}^{макс.})$ и описывается гиперболической функцией обобщенного вида (рис. 4 а):

$$\Psi_K^{макс.} = a - \frac{b}{(1 + c \cdot \sigma_{0,2}^{макс.})^d}, \quad (11)$$

где: $a = 78,422$; $b = 0,011$; $c = 9,90 \cdot 10^{-4}$ [МПа⁻¹]; $d = -9,370$ – эмпирические коэффициенты;

– уровень качества УК характеризуется увеличением пластичности сплава ψ_k до уровня $\Psi_K^{макс.}$ при повышении его прочности $\sigma_{0,2}$ до уровня $\sigma_{0,2}^{макс.}$ (рис. 5 – интервал изменения свойств $\psi_k, \sigma_{0,2}$ от точки «b» к точке максимума «М», что отмечено стрелками на кривой 4). Верхняя граница уровня качества УК по определению совпадает с нижней границей уровня K в интервале изменения прочности $\sigma_{0,2} > 1\ 000$ МПа и с нижней границей уровня

ВК в интервале $\sigma_{0,2} \leq 1\ 000$ МПа, а нижняя представляет собой зависимость $\Psi_K^{sp.} = f(\sigma_{0,2}^{sp.})$ и описывается функцией (3) (рис. 2 б);

– уровень качества НК характеризуется уменьшением пластичности сплава ψ_k при снижении его прочности $\sigma_{0,2}$ (рис. 5 – изменение свойств ψ_k , $\sigma_{0,2}$ слева от точки «b», что отмечено стрелкой на кривой 4). Верхняя граница уровня качества НК по определению совпадает с нижней границей уровня УК и, соответственно, также описывается функцией (3).

В таблице 2 представлены условия для определения уровней качества и их границ для КС 1-го вида².

Таблица 2

Условия для определения уровней качества и их границ для КС 1-го вида

| Уровень качества | Граница уровня качества | Обозначение на рис. 5; расчетная зависимость | | Условия для определения границы | |
|------------------|-------------------------|--|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| | | $\sigma_{0,2} > 1\ 000$ МПа | $\sigma_{0,2} \leq 1\ 000$ МПа | $\sigma_{0,2} > 1\ 000$ МПа | $\sigma_{0,2} \leq 1\ 000$ МПа |
| ВК | Верхняя | кривая 1+; (10, «+») | | $\Psi_k \leq \Psi_K^{1+}$ | |
| | Нижняя | кривая 1-; (10, «-») | | $\Psi_k > \Psi_K^{1-}$ | |
| К | Верхняя | кривая 1-; (10) | -- | $\Psi_k \leq \Psi_K^{1-}$ | -- |
| | Нижняя | кривая 2; (11) | -- | $\Psi_k > \Psi_K^{max.}$ | -- |
| УК | Верхняя | кривая 2; (11) | кривая 1-; (10) | $\Psi_k \leq \Psi_K^{max.}$ | $\Psi_k \leq \Psi_K^{1-}$ |
| | Нижняя | кривая 3; (3) | | $\Psi_k > \Psi_K^{sp.}$ | |
| НК | Верхняя | кривая 3; (3) | | $\Psi_k \leq \Psi_K^{sp.}$ | |

На рисунке 6 представлена диаграмма расположения по уровням качества КС 2-го вида. Диаграмма отражает общие принципы определения уровней качества, границ между ними и некоторые особенности, свойственные для этого вида сплавов, а именно:

² Здесь и далее при определении границ уровней качества используется консервативный подход.

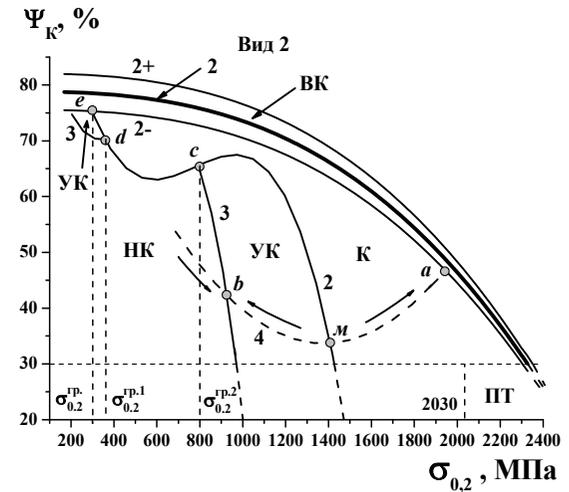


Рис. 6. Диаграмма расположения КС 2-го вида по уровням качества: ВК, К, УК, НК – уровни качества; зависимость оптимальной пластичности Ψ_K^{opt} от прочности $\sigma_{0,2}$ (кривая оптимизации 2); верхняя граница уровня ВК (кривая 2+); нижняя граница уровня ВК (кривая 2-); зависимость минимальной пластичности Ψ_K^{min} от минимальной прочности $\sigma_{0,2}^{min}$ в точках минимумов вогнутых зависимостей $\psi_k = f(\sigma_{0,2})$ при $K_{ms} = const$ (кривая 2); зависимость критического значения пластичности Ψ_K^{sp} от критического значения прочности $\sigma_{0,2}^{sp}$ (кривая 3); зависимость пластичности ψ_k от прочности $\sigma_{0,2}$ при $K_{ms} = const$ (кривая 4); точки пересечения кривых: a – 2- и 4; m – 2 и 4; b – 3 и 4; c – 2 и 3 при $\sigma_{0,2}^{sp,2}$; d – 2- и 3 при $\sigma_{0,2}^{sp,1}$; e – 2- и 2 при $\sigma_{0,2}^{sp,2}$; $\sigma_{0,2}^{sp,2}$, $\sigma_{0,2}^{sp,1}$, $\sigma_{0,2}^{sp,2}$ – граничные значения прочности; ПТ – перспективные технологии

– расположение уровня качества ВК, его характерные особенности и принцип построения границ аналогичны таким же факторам для КС 1-го вида, изложенным выше, а верхняя и нижняя границы уровня ВК для КС 2-го вида (см. рис. 6 – кривые 2+ и 2-) описываются зависимостью, производной от (9):

$$\Psi_K^{2+,2-} = \pm 3 \cdot s \cdot \left[a - \frac{b}{(1 + c \cdot \sigma_{0,2})^d} \right], \quad (12)$$

где $s = 1,37$ – выборочный стандарт для КС 2-го вида [10]; знак «+» для верхней, знак «-» – для нижней границы уровня ВК; a, b, c, d – эмпирические коэффициенты, входящие в (9);

– уровень качества K имеет ограничение по прочности $\sigma_{0,2}^{sp.} = 300$ МПа и, таким образом, характерен только для КС при $\sigma_{0,2} > \sigma_{0,2}^{sp.}$. Это ограничение связано с тем, что точка минимума «м» ($\psi_K^{мин.}$, $\sigma_{0,2}^{мин.}$) зависимости $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при условии $K_{ms} = const$ близка к нижней границе уровня качества ВК (рис. 6 – кривая 2-) на уровне механической стабильности $K_{ms} = 3,0$, что приводит к пересечению экстраполированной зависимости $\psi_K^{мин.} = f(\sigma_{0,2}^{мин.})$ и указанной границы уровня ВК (рис. 6 – точка «е» на пересечении кривых 2 и 2-) при достижении граничной прочности $\sigma_{0,2}^{sp.} = 300$ МПа. Таким образом уровень качества K характеризуется повышением пластичности сплава ψ_K , начиная от уровня $\psi_K^{мин.}$ при возрастании его прочности $\sigma_{0,2}$ от уровня $\sigma_{0,2}^{мин.}$ (рис. 6 – интервал изменения свойств ψ_K , $\sigma_{0,2}$ от точки минимума «м» к точке «а», что отмечено стрелкой на кривой 4). Верхняя граница уровня K по определению совпадает с нижней границей уровня ВК, а нижняя представляет собой зависимость вида $\psi_K^{мин.} = f(\sigma_{0,2}^{мин.})$ и описывается кубическим полиномом вида (рис. 4 б):

$$\psi_K^{мин.} = a - b \cdot \sigma_{0,2}^{мин.} + c \cdot (\sigma_{0,2}^{мин.})^2 - d \cdot (\sigma_{0,2}^{мин.})^3, \% \quad (13)$$

где $a = 131,279$; $b = 0,291$ [МПа⁻¹]; $c = 3,980 \cdot 10^{-4}$ [МПа⁻²]; $d = 1,709 \cdot 10^{-7}$ [МПа⁻³] – эмпирические коэффициенты;

– уровень качества УК характеризуется увеличением пластичности сплава ψ_K от уровня $\psi_K^{мин.}$ при снижении его прочности $\sigma_{0,2}$, начиная от уровня $\sigma_{0,2}^{мин.}$ (рис. 6 – интервал изменения свойств ψ_K , $\sigma_{0,2}$ от точки минимума «м» к точке «б», что отмечено стрелкой на кривой 4). Верхняя граница уровня УК по определению совпадает с нижней границей уровня K в интервалах изменения прочности $\sigma_{0,2} > 800$ МПа и 300 МПа $< \sigma_{0,2} < 360$ МПа, а также с нижней границей уровня ВК в интервале $\sigma_{0,2} \leq 300$ МПа, а нижняя представляет собой зависимость $\psi_K^{sp.} = f(\sigma_{0,2}^{sp.})$ и описывается, как и в случае КС 1-го вида, функцией (3) в интервалах изменения прочности $\sigma_{0,2} > \sigma_{0,2}^{sp.2} = 800$ МПа и $\sigma_{0,2} < \sigma_{0,2}^{sp.1} = 360$ МПа;

– уровень качества НК характеризуется увеличением пластичности сплава ψ_K за счет снижения его прочности $\sigma_{0,2}$ (рис. 6 – изменение свойств ψ_K , $\sigma_{0,2}$ слева от точки «б», что отмечено стрелкой на кривой 4). Верхняя граница уровня НК по определению совпадает с нижней границей уровня УК в интервалах изменения прочности $\sigma_{0,2} \geq \sigma_{0,2}^{sp.2} = 800$ МПа, $\sigma_{0,2} \leq \sigma_{0,2}^{sp.1} = 360$ МПа и, соответственно, также описывается функцией (3) в этих интервалах, а в интервале изменения прочности $\sigma_{0,2}^{sp.1} \leq \sigma_{0,2} \leq \sigma_{0,2}^{sp.2}$ – с

нижней границей уровня K и описывается функцией (13) (рис. 6) – интервал изменения свойств $\psi_k, \sigma_{0,2}$ от точки «d» к точке «с» при повышении прочности $\sigma_{0,2}$.

В таблице 3 представлены условия для определения уровней качества и их границ для КС 2-го вида.

Таблица 3
Условия для определения уровней качества и их границ для КС 2-го вида

| Уровень качества | Граница уровня качества | Обозначение на рис. 6; расчетная зависимость | | | Условия для определения границы | | |
|------------------|-------------------------|--|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | $\sigma_{0,2} > 300$ МПа | $\sigma_{0,2} \leq 300$ МПа | | $\sigma_{0,2} > 300$ МПа | $\sigma_{0,2} \leq 300$ МПа | |
| ВК | Верхняя | кривая 2+; (12, «+») | | | $\psi_k \leq \Psi_K^{2+}$ | | |
| | Нижняя | кривая 2-; (12, «-») | | | $\psi_k > \Psi_K^{2-}$ | | |
| К | Верхняя | кривая 2-; (12) | -- | | $\psi_k \leq \Psi_K^{2-}$ | -- | |
| | Нижняя | кривая 2; (13) | -- | | $\psi_k > \Psi_K^{мин.}$ | -- | |
| УК | Верхняя | $\sigma_{0,2} > 800$ МПа | $300 < \sigma_{0,2} < 360$ МПа | $\sigma_{0,2} \leq 300$ МПа | $\sigma_{0,2} > 800$ МПа | $300 < \sigma_{0,2} < 360$ МПа | $\sigma_{0,2} \leq 300$ МПа |
| | | кривая 2; (13) | | кривая 2-; (12) | $\psi_k \leq \Psi_K^{мин.}$ | | $\psi_k \leq \Psi_K^{2-}$ |
| | Нижняя | $\sigma_{0,2} > 800$ МПа | $\sigma_{0,2} < 360$ МПа | | $\sigma_{0,2} > 800$ МПа | $\sigma_{0,2} < 360$ МПа | |
| | | кривая 3; (3) | | | $\psi_k > \Psi_K^{кр.}$ | | |
| НК | Верхняя | $\sigma_{0,2} \geq 800$ МПа | $\sigma_{0,2} \leq 360$ МПа | $360 < \sigma_{0,2} < 800$ МПа | $\sigma_{0,2} \geq 800$ МПа | $\sigma_{0,2} \leq 360$ МПа | $360 < \sigma_{0,2} < 800$ МПа |
| | | кривая 3; (3) | | кривая 2; (13) | $\psi_k \leq \Psi_K^{кр.}$ | | $\psi_k \leq \Psi_K^{мин.}$ |

Из рисунка 6 видно, что все границы уровней качества ограничены снизу уровнем минимальной пластичности $\psi_K^{мин.} \approx 24,8\%$ [10]. Это связано с тем, что исследованная выборка КС 2-го вида не содержит сплавов, у которых прочность $\sigma_{0,2}$ превышала бы значение 2030 МПа на уровнях механической стабильности $K_{ms} < 1,3$. В предлагаемой системе взаимосвязи свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» оптимизированным свойствам механической стабильности, например, в интервале $1,1 \leq K_{ms}^{опт.} \leq$

1,2 отвечал бы интервал оптимизированной пластичности $26\% \leq \psi_K^{opt.} \leq 32\%$, а максимальная прочность таких КС изменялась бы в пределах от 2 290 МПа до 2 400 МПа. Вследствие этого, область, ограниченная на рисунке 6 уровнями прочности $\sigma_{0,2} > 2\ 030$ МПа и минимальной пластичности $\psi_K^{min.} < 24,8\%$, названа областью перспективных технологий (ПТ)³ для КС.

Отдельный интерес для обсуждения представляет область изменения прочности $\sigma_{0,2}^{sp.1} \leq \sigma_{0,2} \leq \sigma_{0,2}^{sp.2}$, в которой отсутствует переходной уровень качества УК (рис. 6). Эта область характерна для КС низкой и средней прочности и ограничена точками «d» ($\psi_K = 70,0\%$; $\sigma_{0,2} = 360$ МПа) и «с» ($\psi_K = 65,5\%$; $\sigma_{0,2} = 800$ МПа), координаты которых принадлежат зависимостям $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при $K_{ms} = 2,2$ и $K_{ms} = 2,0$ соответственно. Таким образом, в указанный интервал изменения прочности попадают только качественные сплавы с уровнем $K_{ms} \geq 2,0$ и сплавы низкого качества с уровнем $K_{ms} \leq 1,5$, что и является причиной отсутствия уровня УК в этом интервале прочности [10]. Примерами таких КС могут являться: качественные стали такие, как 15ГБ ($\psi_K = 71,0\%$, $\sigma_{0,2} = 383$ МПа, $K_{ms} = 2,34$); 15Г2АФ ($\psi_K = 72,0\%$, $\sigma_{0,2} = 395$ МПа, $K_{ms} = 2,17$) и стали низкого качества такие, как 20ХГСНДМЛ ($\psi_K = 20,0\%$, $\sigma_{0,2} = 500$ МПа, $K_{ms} = 1,31$); 45Л ($\psi_K = 20,0\%$, $\sigma_{0,2} = 400$ МПа, $K_{ms} = 1,17$).

Результаты определения мер оптимальности по механической стабильности μ_{Kms}^σ при заданной прочности $\sigma_{0,2}$ и расположения по уровням качества некоторых КС различных групп⁴ и видов представлены в таблице 4. Анализ этих результатов позволяет сделать ряд заключений:

- близость величины показателя μ_{Kms}^σ к единице в рамках соответствующих доверительных интервалов по определению означает принадлежность сплава к высшему уровню качества ВК (см. раздел 3.3);
- в некоторых случаях сравнительно низкая величина показателя μ_{Kms}^σ на уровне 0,7–0,8 приводит к расположению сплавов на высоких уровнях качества (ВК, К, УК) – это, в первую очередь, зависит от уровня прочности и вида сплава в системе взаимосвязи «пластичность – прочность – механическая стабильность» (см. пп. 4, 8, 12–14, 18, 22, 39 – здесь и далее в указанной таблице 4, а также рис. 5 и 6);
- условия термообработки влияют не только на принадлежность КС к определенному виду, но и на расположение по уровням качества в широком

³ При этом все предлагаемые методики вполне пригодны для анализа сплавов с уровнем прочности $\sigma_{0,2} \leq 2\ 030$ МПа и $K_{ms} < 1,3$.

⁴ Группа КС зависит от соотношения значений величины показателя деформационного упрочнения n при деформациях меньших и больших равномерной [21].

температурном интервале (сравнить, например, пп. 11–14 и 15–18 для стали 12ХНЗМФА);

– принадлежность сплава к определенному виду зависит как от его группы (см. пп. 3 и 4; 6 и 7; 33 и 34 и др.), так и от температуры испытаний в пределах одной группы (сравнить пп. 4 и 5; 8 и 9; 11, 12 и 13, 14; 25 и 26 и др.);

– при помощи предлагаемой методики можно выявить температуру или температурный интервал, в которых металл проявляет наилучшие показатели качества (сравнить пп. 1 и 2; 13 и 11, 12, 14; 19, 20 и 21) либо, наоборот, теряет свою надежность (утрачивает качество) в смысле снижения сопротивляемости хрупкому разрушению (сравнить пп. 3 и 4; 8 и 9; 22 и 23, 24; 36 и 37). Все вышесказанное в полной мере касается условий термообработки, технологий сварки и соответствующих структурных состояний сплавов (сравнить пп. 11 и 15; 4 и 6; 31 и 32).

Особый интерес для анализа представляет сравнение высококачественных (ВК) КС 1-го и 2-го видов, для чего необходимо дополнительно рассмотреть зависимость $\psi_K^{opt.} = f(K_{ms}^{opt.})$, представленную на рисунке 7 [10]. Из этого рисунка видно, что для сплавов с уровнем оптимальной механической стабильности $K_{ms}^{opt.} > 1,7$ величина оптимальной пластичности для сплавов обоих видов превышает значение 64 %, при этом величина $\psi_K^{opt.}$ для КС 1-го вида превышает значения $\psi_K^{opt.}$ для сплавов 2-го вида во всем интервале изменения $K_{ms}^{opt.}$, а при $K_{ms}^{opt.} \leq 1,7$ наблюдается противоположная тенденция. Вследствие этого, принадлежность высококачественных и особо высококачественных сталей (см. табл. 1) ответственного назначения к определенному виду обуславливает повышенные показатели ψ_K при соответствующем уровне K_{ms} – сравнить, например, свойства следующих сталей, имеющих уровень качества ВК при комнатной температуре испытаний: 50Х (закалка, отпуск 437 К; $\psi_K = 46,7$ %, $\sigma_{0,2} = 1\ 920$ МПа, $K_{ms} = 1,48$), принадлежащая ко 2-му виду, и 60С2Н2А (закалка 1 143 К, отпуск 653 К; $\psi_K = 40,0$ %, $\sigma_{0,2} = 1\ 820$ МПа, $K_{ms} = 1,47$) – к 1-му виду или АК-35 (состояние поставки; $\psi_K = 75,0$ %, $\sigma_{0,2} = 1\ 027$ МПа, $K_{ms} = 1,89$), принадлежащая к 1-му виду, и АК-37 (состояние поставки; $\psi_K = 67,0$ %, $\sigma_{0,2} = 1\ 315$ МПа, $K_{ms} = 1,88$) – ко 2-му виду.

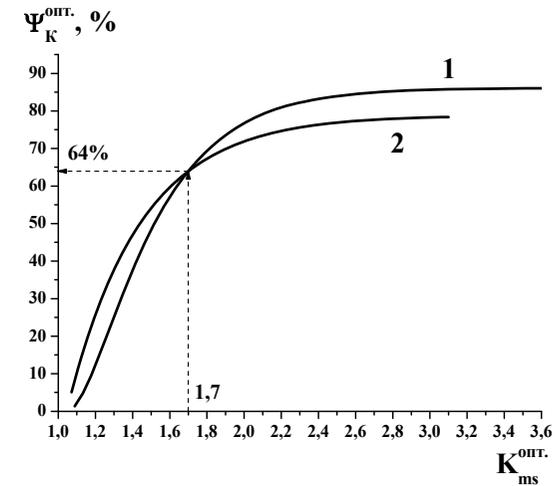


Рис. 7. Закономерности изменения оптимальных значений пластичности Ψ_K^{opt} от оптимальных значений механической стабильности K_{ms}^{opt} для КС: 1-го вида – кривая 1; 2-го вида – кривая 2

В таблице 5 приведены результаты оценки точности построения границ между уровнями качества К – УК и УК – НК для обоих видов КС⁵.

Таблица 5
Оценка точности аппроксимации зависимостей (3), (11) и (13), используемых для построения границ КС

| Вид | Граница | № зависимости | s, % | ПОД | ДИ, % | P |
|-----|---------|---------------|------|----------|-------|-------|
| 1 | К – УК | (11) | 1,58 | ψ_k | ±3,0 | 0,943 |
| | УК – НК | (3) | 1,27 | ψ_k | ±3,0 | 0,982 |
| 2 | К – УК | (13) | 1,31 | ψ_k | ±3,0 | 0,978 |
| | УК – НК | (3) | 1,27 | ψ_k | ±3,0 | 0,982 |

Примечание: s – выборочный стандарт; ПОД – параметр для определения достоверности; ДИ – доверительный интервал; P – достоверность.

⁵ Точность построения границ уровня качества ВК определяется точностью построения кривых оптимизации.

Из таблицы 5 видно, что точность аппроксимации зависимостей (3), (11) и (13), при которой выборочный стандарт не превышает 1,58 % с достоверностью не ниже 0,943 в доверительном интервале $\pm 3,0$, достаточна для практического применения принципов расположения КС по уровням качества.

Итоговый вывод по развитой здесь системе расположения КС по уровням качества сводится к следующему: с увеличением прочности $\sigma_{0,2}$ требования по свойствам, защищающим от хрупкости, кардинально различаются для сплавов разных уровней качества. Однако это различие не относится к абсолютным значениям показателей пластичности ψ_k и/или механической стабильности K_{ms} , т.к. практически одинаково высокий уровень ψ_k и K_{ms} возможен как для сплавов уровня качества ВК и НК, но ключевое различие состоит в соответствующих уровнях прочностей $\sigma_{0,2}$ этих групп КС. Низкокачественные сплавы (уровень НК) могут иметь довольно высокие значения ψ_k (~ 60–65 %), но только для КС с низкой прочностью $\sigma_{0,2}$ (~ 300–400 МПа), а с повышением прочности, например, до 1 000 МПа уровень ψ_k и K_{ms} катастрофически падает. Более качественные КС (уровни УК и К) проявляют такое неизбежное падение характеристик ψ_k и K_{ms} при более высоких уровнях прочности $\sigma_{0,2}$ (~ 1 600–2 000 МПа). И только сплавы с уровнем качества ВК обязаны сохранять наивысший уровень защиты от хрупкости во всем интервале изменения прочности – от ~ 200 до ~ 2 000 МПа.

Таким образом, признак стабильно наивысшего уровня защищенности от хрупкости независимо от уровня прочности сплава – есть признак наивысшего качества металла (ВК) и, напротив, резкая ограниченность возможностей сплава по его защите от хрупкости при увеличении прочности – есть неперменный признак его плохого качества. Таковы общие закономерности в предлагаемой системе оценки качества конструкционных сплавов. При этом основным «индикатором» качества, отражающим способность металла сопротивляться хрупкости в количественном измерении, остается мера оптимальности по механической стабильности μ_{Kms}^σ при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$.

5. Выводы

1. Отношение величины механической стабильности выбранного сплава K_{ms} к ее оптимальному значению $K_{ms}^{onm.}$ может быть использовано в виде меры оптимальности металла μ_{Kms}^σ по механической стабильности K_{ms} при заданной прочности $\sigma_{0,2}$, отражающей сравнительную способность металла сопротивляться хрупкому разрушению при одноосном растяжении.

2. Расположение конструкционных сталей по уровням качества и определение границ между этими уровнями отражается характером поведения их базовых механических характеристик в системе взаимосвязи «пластичность – прочность – механическая стабильность». Принципы определения уровней качества и границ между ними зависят от вида сплава и имеют свои отличительные особенности.

3. Принадлежность высококачественных конструкционных сталей ответственного назначения к определенному виду обуславливают повышенные показатели пластичности ψ_k при соответствующем уровне механической стабильности K_{ms} .

4. При помощи предлагаемых подходов к оценке качества конструкционных сталей можно дополнить их общепринятую условную классификацию новой, позволяющей провести разделение на условные уровни качества и детализировать количественную оценку внутри каждого уровня по величине индикатора качества – меры оптимальности (качества) металла μ_{Kms}^σ по механической стабильности K_{ms} при заданной прочности $\sigma_{0.2}$. Такая детализированная оценка качества стали будет способствовать более точной ориентации потребителя при определении области ее надежного технического применения.

Литература

1. Сорокин В. Г. Стали и сплавы. Марочник / В. Г. Сорокин, М. А. Гервасьев, В. С. Палеев, И. В. Гервасьева, С. Я. Палева // М. : Ингермет. Инжиниринг, 2001. – 608 с.
2. Шмыков А. А. Справочник термиста. 4-е изд. / А. А. Шмыков // М. : Машгиз, 1961. – 392 с.
3. Тылкин М. А. Справочник термиста ремонтной службы / М. А. Тылкин // М. : Металлургия, 1981. – 648 с.
4. Шапиро И. А. К вопросу оценки надежности профильных труб / И. А. Шапиро, В. Б. Фурманов, В. В. Лариков, Ю. А. Карлов // Сталь. – 2011. – № 7. – С. 73–76.
5. Шапиро И. А. О некоторых новых критериях определения предельного состояния металла и труб из него / И. А. Шапиро, В. Б. Фурманов, Ю. С. Пройдак, В. В. Лариков, А. Г. Польский // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – № 7. – С. 45–48.
6. Котречко С. А. Предельная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции / С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков // К. : Наук. думка, 2008. – 295 с.
7. Котречко С. А. Концепция механической стабильности конструкционных сталей / С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков // Проблемы прочности. – 2009. – № 2. – С. 55–78.
8. Котречко С. А. Механическая стабильность – универсальная мера сопротивления переходу в хрупкое состояние металла / С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян // Успехи физики металлов. – 2009. – № 2. – С. 207–228.
9. Шиян А. В. Физическое обоснование критерия классификации конструкционных сталей по прочности / А. В. Шиян // Металлофизика и новейшие технологии. – 2011. – № 12. – С. 1703–1716.
10. Шиян А. В. Взаимосвязь свойств прочности, пластичности и механической стабильности конструкционных сталей / А. В. Шиян, С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, Е. Ф. Сорока, О. П. Носенко, И. С. Фёдорова

// Металознавство та термічна обробка металів / Дн-вськ :ПДАБА, 2013. – № 4. – С. 12–30.

11. Котречко С. А. Новые подходы к оценке взаимосвязи свойств прочности, пластичности и механической стабильности / С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, Н. Н. Стеценко // Металлофизика и новейшие технологии. – 2011. – № 9. – С. 1277–1290.

12. Мешков Ю. Я. Новый подход к оценке качества конструкционных сталей / Ю. Я. Мешков, С. А. Котречко, А. В. Шиян, В. И. Большаков, О. П. Носенко, А. В. Мурашкин // Сталь. – 2012. – № 8. – С. 66–71.

13. Патент 66341, МПК 11, G01N, № 3/00, 3/08, 3/18, 19/00. Україна. Спосіб оцінки якості конструкційної сталі / Шиян А. В., Котречко С. О., Мешков Ю. Я., Стеценко Н. М., Большаков В. І., Носенко О.П. // Промислова власність. – 2011. – Бюл. № 24.

14. Шиян А. В. Определение характеристик хрупкой прочности и механической стабильности конструкционных сталей /А. В. Шиян // МТОМ. – Дн-вськ : ПДАБА, 2012. – № 3-4. – С. 29–56.

15. Котречко С. А. Пластичность и хладостойкость конструкционных сталей / С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян // Проблемы прочности. – 2010. – № 1. – С. 112–119.

16. Мешков Ю. Я. Разрушение деформированной стали / Ю. Я. Мешков, Т. Н. Сердитова // К. : Наук. думка, 1989. – 160 с.

17. Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях / Под ред. Г. С. Писаренко // К. : Наук. думка, 1980.

18. Кошелев П. Ф. Прочность и пластичность конструкционных материалов при низких температурах / П. Ф. Кошелев, С. Е. Беляев // М. : Машиностроение, 1967. – 315 с.

19. Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие / Под ред. В. В. Панасюка // К. : Наук. думка, 1988. – 1–4.

20. Сигорский В. П. Математический аппарат инженера / В. П. Сигорский // К. : Техника, 1977. – 768 с.

21. Котречко С. А. Закономерности изменения показателя деформационного упрочнения конструкционных сталей при деформациях, больших равномерной / С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, К. Ф. Сорока, О. П. Носенко // Сталь. – 2013. – № 6. – С. 70–76.

УДК 669.01:539.4;539.2

Методические основы оценки качества конструкционных сталей по их способности сопротивляться хрупкому разрушению при одноосном растяжении / А. В. Шиян, С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, Е. Ф. Сорока, О. П. Носенко, И. С. Фёдорова // Металознавство та термічна обробка металів : науков. та інформ. журнал / Д. : ДВНЗ ПДАБА, 2014. – № 1. – С. ___ – Табл. 5. – Рис. 7. – Бібліогр. : (21 назва).

Сформулированы представления о качестве конструкционных сталей, как о мере их способности сопротивляться хрупкому разрушению. Показано, что для этой цели может быть использована предложенная ранее характеристика механической стабильности K_{ms} . Разработан метод оценки качества сплавов по степени близости значений свойств пластичности Ψ_K и механической стабильности K_{ms} к оптимальным при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$. Предложен новый «индикатор» качества конструкционных сталей – мера оптимальности по механической стабильности K_{ms} при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$, отражающая их сопротивляемость переходу в хрупкое состояние. На основе системы взаимосвязи свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» разработана статистически достоверная методика расположения сплавов по уровням качества. Для ряда конструкционных сталей различной прочности проведена оценка качества по показателю меры оптимальности и их условное расположение по уровням качества.

Сформульовано уявлення про якість конструкційних сталей, як про міру їх здібності опиратися крихкому руйнуванню. Показано, що для досягнення цієї цілі може бути використана запропонована раніше характеристика механічної стабільності K_{ms} . Розроблено метод оцінки якості сплавів по ступеню близькості значень властивостей пластичності Ψ_K та механічної стабільності K_{ms} до оптимальних при заданому значенні міцності $\sigma_{0,2}$. Запропоновано новий «індикатор» якості конструкційних сталей – міра оптимальності по механічній стабільності K_{ms} при заданому значенні міцності $\sigma_{0,2}$, що відображає їх опірність переходу в крихкий стан. На основі системи взаємозв'язку властивостей «пластичність – міцність – механічна стабільність» розроблено статистично достовірну методику розташування сплавів по рівням якості. Для ряду конструкційних сталей різної міцності проведено оцінку якості по показнику міри оптимальності та їх умовне розташування по рівням якості.

Ideas on the quality of structural steels as a measure of their ability to resist brittle fracture are formulated. It is shown that the characteristic of mechanical stability K_{ms} , proposed earlier, can be used for this purpose. Technique to evaluate quality of alloys by closeness of ductility Ψ_K and mechanical stability K_{ms} to their optimal values at given strength value $\sigma_{0,2}$ is developed. New "indicator" of quality of structural steels - a measure of optimality relatively to the mechanical stability K_{ms} at a given value of strength $\sigma_{0,2}$, which reflects their resistibility to transition to a brittle state, is proposed. Based on the relationship of properties "plasticity - strength - mechanical stability", statistically valid technique for classification of alloys by their quality levels is developed. For several structural steels of various strengths, both quality assessment in terms of measures of optimality and their conditional ranking by quality levels is executed.