

УДК 620.17:620.162.2

ОПТИМИЗАЦИЯ СВОЙСТВ ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИТЕРИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ

© А. В. Шиян, С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, Е. Ф. Сорока¹

Статья поступила 21 ноября 2013 г.

Установлено, что взаимосвязь свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» конструкционных сталей имеет системный характер, а закономерности, связывающие пластичность (ψ_k) и прочность ($\sigma_{0.2}$) при условии постоянства механической стабильности K_{ms} , могут быть описаны параболическими зависимостями, имеющими два вида по типу экстремумов — с наличием максимума и минимума. Построена обобщенная диаграмма взаимосвязи свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» и получены уравнения, отражающие ее структуру и свойства. На основе обобщенной диаграммы найдены интервалы оптимизированных значений пластичности и механической стабильности, характеризующие наиболее высокие уровни качества конструкционных сталей разной прочности. Установлена инвариантность полученных зависимостей, определяющих фиксированные уровни K_{ms} , к различным сочетаниям прочностных и пластических свойств исследованных материалов, режимам их термической обработки, а также к температурам испытаний.

Ключевые слова: механическая стабильность; оптимизация свойств; обобщенная диаграмма; кривая оптимизации; оптимальные сочетания свойств.

Поиск критерия и методов оптимизации базовых механических свойств конструкционных металлических сплавов приобретает все большее значение в связи с глобальной тенденцией к повышению прочности конструкционных материалов за счет улучшения их качества.

В существующей методологии оценки качества конструкционных сталей (КС) определяются не ключевые механические характеристики, влияющие на хрупкость, а параметры, лишь косвенно отражающие степень «хрупкого» состояния при соответствующем виде испытания: ψ_k , δ_k (δ_5 , δ_{10}) — относительное сужение и относительное удлинение после разрушения образца, получаемые при испытании стандартных образ-

¹ Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Киев, Украина; e-mail: katerok@imp.kiev.ua

цов на одноосное статическое растяжение [1, 2]; ударная вязкость (KCV и KCU — удельные работы разрушения образцов с надрезом Шарпи и с надрезом Менаже), которая находится при динамических (ударных) испытаниях [3, 4]; вязкость разрушения (K_{Ic} , K_{Jc}), определяемая при испытаниях на статическую трещиностойкость [5, 6]. Как показано в работах [7–10], эти характеристики отражают способность металла сопротивляться хрупкому разрушению применительно к конкретным условиям напряженно-деформированного состояния, создаваемого в металле при механических испытаниях образцов соответствующего типа. Однако несмотря на многолетнюю практику применения вышеуказанных характеристик, ни одна из них не стала полноценной инженерной расчетной характеристикой эксплуатационной надежности металла, поскольку отсутствует само понятие физически обоснованных «допускаемых» величин ψ_K или KCV (KCU).

Известно, в частности, что критерием сопротивления хрупкому разрушению в условиях одноосного растяжения может являться одна из базовых характеристик металла — механическая стабильность K_{ms} , которая для конструкционных сплавов определяется согласно зависимости [10, 11]

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

где R_{mc} — уровень хрупкой прочности металла; σ_2 — прочность пластичного металла при критической степени деформации e_c , равной 2 %; $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести; n — показатель деформационного упрочнения.

Величина K_{ms} в безразмерных единицах характеризует способность металла оказывать сопротивление переходу в хрупкое состояние в условиях одноосного растяжения, предопределяя в конечном итоге величину относительного сужения (пластичности) ψ_K [7].

На практике оптимизация комплекса механических свойств сплава — прочности ($\sigma_{0,2}$), пластичности (ψ_K) и механической стабильности (K_{ms}) во многом зависит от степени взаимной чувствительности изменения одних свойств по отношению к другим. Поэтому детальное рассмотрение таких взаимосвязей в виде определенных аналитических зависимостей должно не только выявить основные их закономерности, но и оценить степень чувствительности характеристик пластичности к изменению свойства прочности сплавов.

В связи с этим понятна важность полученных в работах [12, 13] закономерностей согласованного изменения прочностных ($\sigma_{0,2}$) и пластических (ψ_K) свойств сплавов на основе железа, при котором уровень механической стабильности остается постоянным ($K_{ms} = \text{const}$). В указанных работах отмечена актуальность проблемы определения уровней пластич-

ности, обеспечивающих заданную механическую стабильность для КС, обладающих различными сочетаниями прочностных и пластических характеристик.

Детальный анализ сопротивляемости хрупкому разрушению КС показал [14–16], что в зависимости от соотношения значений показателя деформационного упрочнения n при деформациях, меньших и больших равномерной, все сплавы можно разделить на три группы. Первая характеризуется практически неизменным значением n , вторая — его увеличением, а третья — снижением n в области локализованной пластической деформации [15]. Получены [16] зависимости для расчета характеристик хрупкой прочности R_{mc} для КС групп I–III. Хрупкая прочность для КС I-й группы

$$R_{mc}^I = \sigma_{0,2} \cdot 10^{n \lg \bar{e}_{\text{экв}}^I} = \sigma_{0,2} \cdot 10^{n(1+an)}, \quad (2)$$

где $\bar{e}_{\text{экв}}^I = e_{\text{экв}}^I / 0,002$ — приведенное значение эквивалентной деформации; n — показатель деформационного упрочнения; $a = 13,582$ — эмпирический коэффициент.

Для КС II-й группы

$$R_{mc}^{II} = S_B \cdot 10^{n^{II} \lg \bar{e}_{\text{экв}}^{II}}, \quad (3)$$

где $\lg \bar{e}_{\text{экв}}^{II} = a(n^{II}/n - 1)^b$; $a = \frac{AT_{\text{исп}} - B}{T_{\text{исп}} - C}$; $b = D - FT_{\text{исп}} + NT_{\text{исп}}^2$; $A = 1,167$; $B = 56,361$; $C = 9,847$; $D = 0,823$; $F = 0,004$ [K⁻¹]; $N = 8,7 \cdot 10^{-6}$ [K⁻²] — эмпирические коэффициенты; $m = n^{II} \lg \bar{e}_{\text{экв}}^{II} - n$; $\bar{e}_{\text{экв}}^{II} = e_{\text{экв}}^{II} / e_p$ — приведенное значение эквивалентной деформации; $T_{\text{исп}}$ — температура испытаний на одноосное растяжение, К; e_p — истинная равномерная деформация; n^{II} — показатель деформационного упрочнения в области локальной деформации (определяется согласно методике работы [15]); S_B — истинное напряжение на пределе прочности, МПа.

Хрупкая прочность для КС III группы

$$R_{mc}^{III} = S_B \cdot 10^{n^{III} \lg \bar{e}_{\text{экв}}^{III}}, \quad (4)$$

где $\lg \bar{e}_{\text{экв}}^{III} = a(1 - n^{III}/n)^b$; $a = \frac{AT_{\text{исп}} - B}{T_{\text{исп}} + C}$; $b = D + FT_{\text{исп}} - NT_{\text{исп}}^2$; $A = 11,124$; $B = 494,944$; $C = 799,844$; $D = -0,04$; $F = 0,01$ [K⁻¹]; $N = 3,0 \cdot 10^{-5}$ [K⁻²] — эмпирические коэффициенты; $m = n^{III} \lg \bar{e}_{\text{экв}}^{III} - n$; $\bar{e}_{\text{экв}}^{III} = e_{\text{экв}}^{III} / e_p$ — приведенное значение эквивалентной деформации; n^{III} — показатель деформационного упрочнения в области локальной деформации (определяется согласно методике работы [15]). При помощи полученных характеристик хрупкой прочности, а также механической стабильности K_{ms} согласно формуле (1) для широкого круга КС рассмотрены вопросы о взаимосвязи свойств «пластичность — прочность — механическая стабильность» и их оптимизации.

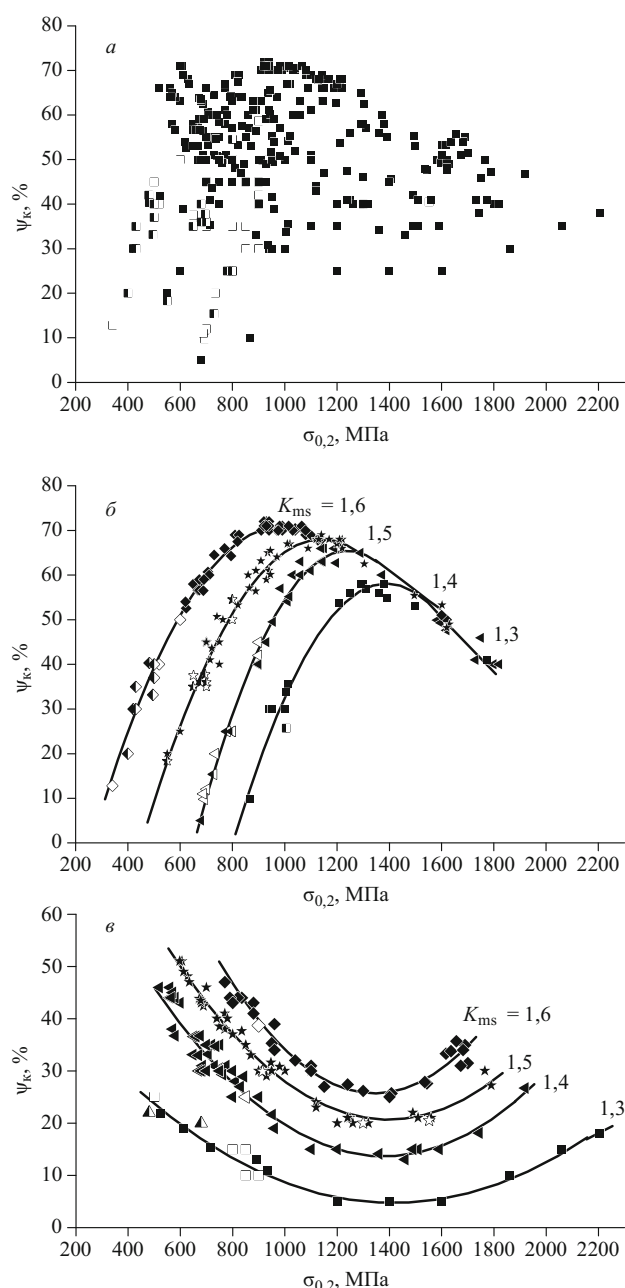


Рис. 1. Зависимости характеристик пластичности ψ_k от прочности $\sigma_{0,2}$ в общем виде (а), а также система корреляционных зависимостей при использовании критерия постоянства уровня механической стабильности $K_{ms} = 1,3 - 1,6$ (б, в): светлые, темные, светло-темные значки соответствуют I – III группам КС

Примечательно, что зависимость пластичности ψ_k от прочности $\sigma_{0,2}$ для КС изначально носит неупорядоченный характер, только предполагающий существование корреляционной связи между параметрами пластичности и прочности с весьма низким коэффициентом корреляции (рис. 1, а). При использовании же критерия механической стабильности $K_{ms} = \text{const}$ эта неупорядоченность превращается в систему корреляционных зависимостей для каждого фиксированного уровня K_{ms} с достаточно высоким (не менее 0,85 – 0,95) коэффициентом корреляции каждой из них (рис. 1, б, в).

Однако исследованная в работах [12, 13] статистическая выборка КС была сравнительно мала, что не позволило выявить целый ряд особенностей зависимости $\psi_k = f(\sigma_{0,2})$.

Поэтому цель данной работы — оптимизация свойств прочности $\sigma_{0,2}$ и пластичности ψ_k конструкционных сталей с использованием условия постоянства величины механической стабильности K_{ms} на основе более полного банка данных этих свойств.

Конструкционные стали для исследований подбирали таким образом, чтобы комбинации их прочностных и пластических характеристик изменялись в широких пределах: $\sigma_{0,2}$ — от 138 до 2250 МПа, а ψ_k — от 86,0 до 1,5 %. При этом использовали КС и сварные швы, относящиеся к различным классам по структуре, качеству, составу и назначению, в том числе специального назначения, применяемые 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 до 293 К. Для анализа использовали результаты эксперимента, полученные в ИМФ им. Г. В. Курдюмова НАН Украины [8, 17], а также справочные и литературные данные из других источников [18 – 23] с целью получения значений базовых механических характеристик КТС в диапазоне температур от 4 до 293 К, которые были обработаны при помощи методики работы [16]. Это позволило собрать достаточный объем данных для корректной статистической обработки. В данной работе представлены результаты обработки около 1500 измерений комплекса механических характеристик более 400 марок КС.

Методика оптимизации прочностных ($\sigma_{0,2}$) и пластических (ψ_k) свойств КС с различными уровнями сопротивляемости хрупкому разрушению при условии постоянства механической стабильности ($K_{ms} = \text{const}$) заключается в следующем:

из всего массива экспериментальных данных выбирают те сплавы, у которых значения характеристики механической стабильности лежат вблизи определенного значения $K_{ms} = \text{const}$ с погрешностью, не превышающей ± 5 %;

строят диаграммы (изолинии) полученных зависимостей $\psi_k = f(\sigma_{0,2})$ при условии $K_{ms} = \text{const}$ во всем реальном для КС диапазоне изменения величины характеристики механической стабильности в упруго-пластической области нагружения $K_{ms} = 1,05 \div 3,5$ с минимальной дискретностью (от 0,05 до 0,2), которую позволяет исследованная выборка (рис. 2).

В результате проведенного анализа установлено, что корреляционные зависимости $\psi_k = f(\sigma_{0,2})$, где ψ_k измеряется в %, $\sigma_{0,2}$ — в МПа, при $K_{ms} = \text{const}$ для всего массива экспериментальных данных КС можно аппроксимировать параболическими функциями

$$\psi_k = a_{1,2} \pm b_{1,2} \sigma_{0,2} \mp c_{1,2} \sigma_{0,2}^2, \quad (5)$$

которые можно разделить на два вида:

1) параболы (см. рис. 2, а), характеризующиеся возрастанием характеристики пластичности ψ_k с увеличением прочности $\sigma_{0,2}$ до максимального значения $\psi_k^{\text{макс}}$ и последующим ее убыванием с дальнейшим повышением $\sigma_{0,2}$ (далее по тексту — выпуклые зависимости $\psi_k = f(\sigma_{0,2})$ вида 1, у которых $b_1 > 0$; $c_1 < 0$);

2) параболы (см. рис. 2, б), характеризующиеся убыванием характеристики пластичности ψ_k с увеличением прочности $\sigma_{0,2}$ до минимального значения $\psi_k^{\text{мин}}$ и последующим ее возрастанием с дальнейшим повышением $\sigma_{0,2}$ (далее по тексту — вогнутые зависимости $\psi_k = f(\sigma_{0,2})$ вида 2, у которых $b_2 < 0$; $c_2 > 0$).

Необходимо отметить, что КС групп I, II и III [15, 16] имеют различное распределение по уровням фиксированных значений K_{ms} . Из рис. 2 видно, что КС, относящиеся к группам I и III, распределяются на ниспадающих левых ветвях парабол как 1-го, так и 2-го видов в широком диапазоне изменения механической стабильности ($1,3 < K_{ms} \leq 3,5$). Исключение составляют КС с низким уровнем сопротивляемости хрупкому разрушению ($K_{ms} \leq 1,3$), которые распределяются на обеих ветвях парабол и относятся преимущественно ко 2-му виду. Такое распределение сплавов I и III групп, как правило, характерно для КС низкой прочности ($\sigma_{0,2} \leq 500$ МПа), обладающих высокими показателями механической стабильности ($K_{ms} \geq 1,7$ для сплавов 1-го вида и $K_{ms} \geq 2,0$ для сплавов 2-го вида). Для КС I и III групп 1-го вида средней прочности ($500 \text{ МПа} < \sigma_{0,2} \leq 1000$ МПа) характерны умеренные уровни механической стабильности ($1,3 < K_{ms} < 1,7$), а для некоторых КС тех же групп 2-го вида, обладающих средним и высоким показателями прочности ($500 \text{ МПа} < \sigma_{0,2} \leq 1600$ МПа), характерны высокие и умеренные K_{ms} ($1,3 < K_{ms} < 2,0$). Сплавы группы II заполняют практически все уровни K_{ms} в интервале прочности $\sigma_{0,2} > 500$ МПа, независимо от вида КС. Исключение составляют КС низкой прочности ($\sigma_{0,2} \leq 500$ МПа), обладающие высокой механической стабильностью: $K_{ms} \geq 2,7$ для 1-го и $K_{ms} \geq 2,2$ для 2-го видов сплавов. Отмеченные особенности распределения различных групп КС по уровням прочности $\sigma_{0,2}$ и механической стабильности K_{ms} согласуются с данными, полученными в работе [15].

Анализ показал, что значения коэффициентов $a_{1,2}$, $b_{1,2}$, $c_{1,2}$ в уравнениях (5) для 1-го и 2-го видов КС при заданных уровнях K_{ms} связаны с характеристикой механической стабильности зависимостями, которые хорошо описываются полиномами 2-й или 3-й степени вида

$$a_{1,2}, b_{1,2}, c_{1,2} = a - bK_{ms} + cK_{ms}^2 - dK_{ms}^3, \quad (6)$$

где a , b , c , d — эмпирические коэффициенты, зависящие от вида сплава.

Используя зависимости (5) и (6), можно описать взаимосвязь свойств пластичности ψ_k , прочности $\sigma_{0,2}$

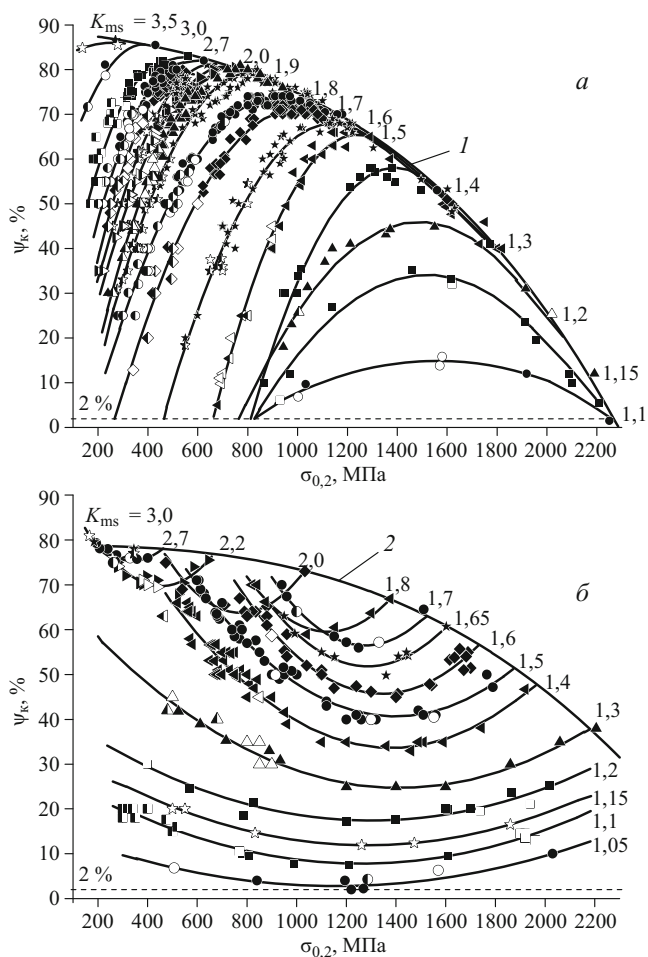


Рис. 2. Взаимосвязь свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» в виде обобщенных диаграмм для КС: а — сплавы 1-го вида — кривая оптимизации 1; б — сплавы 2-го вида — кривая оптимизации 2; светлые, темные, светлосерые значки соответствуют I – III группам КС

и механической стабильности K_{ms} в общем виде для обоих видов сплавов. Графически зависимости $\psi_k = f(\sigma_{0,2}, K_{ms})$ для всей исследованной выборки КС представлены на рис. 3.

На рис. 3 стрелками указаны области изменения значений прочности $\sigma_{0,2}$, для которых характерно сочетание наиболее высоких характеристик пластичности ψ_k и механической стабильности K_{ms} . Для КС низкой и средней прочности 1-го вида (см. рис. 3, а) интервал изменения $\sigma_{0,2}$ составляет от 350 до 450 МПа и от 460 до 800 МПа соответственно, а для высокопрочных КС и сплавов низкой и средней прочности 2-го вида (см. рис. 3, б) — от 1800 до 2200 МПа и от 400 до 800 МПа соответственно.

На основе объединения зависимостей (5) можно построить обобщенную диаграмму взаимосвязи свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» КС, описывающую закономерности изменения пластичности ψ_k от прочности $\sigma_{0,2}$ при фиксированных уровнях механической стабильности K_{ms} (см. рис. 2).

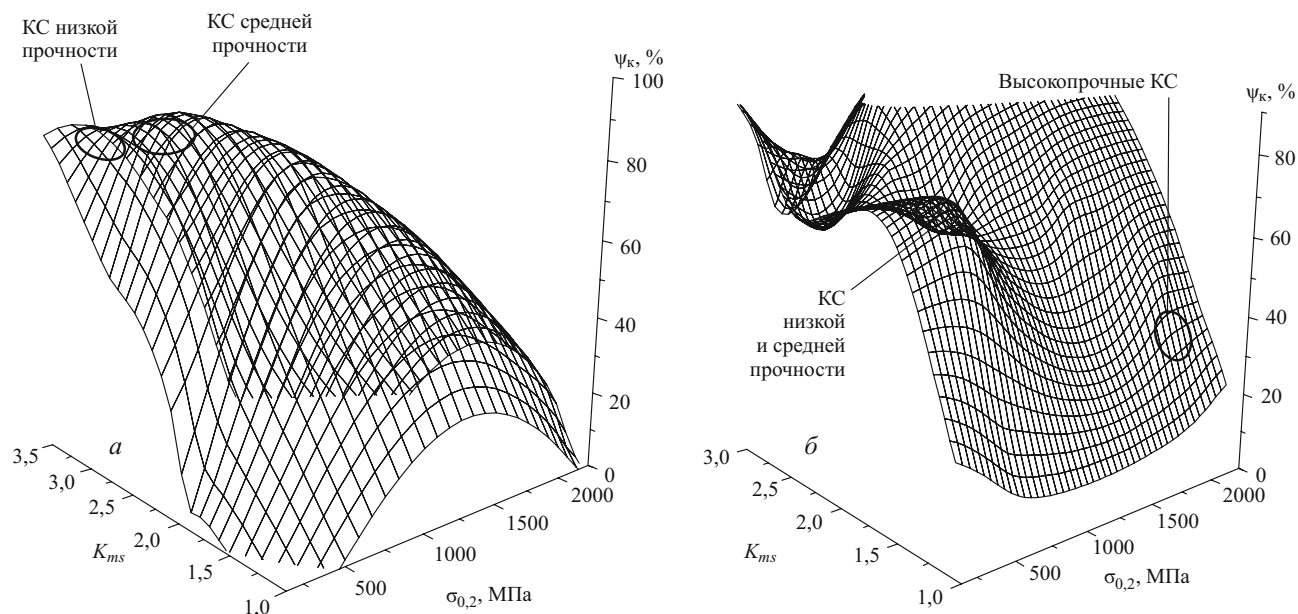


Рис. 3. Взаимосвязь свойств пластичности ψ_k , прочности $\sigma_{0,2}$ и механической стабильности K_{ms} КС: а и б — сплавы 1-го и 2-го видов

Особое значение на обобщенной диаграмме взаимосвязи свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» (см. рис. 2) имеют кривые 1 и 2, которые представляют собой геометрическое место точек, ограничивающих такой предельный комплекс свойств КС, при котором каждому фиксированному значению механической стабильности K_{ms} соответствует максимальная прочность $\sigma_{0,2}$. Такие кривые названы кривыми оптимизации [13, 24], смысл которых заключается в том, что они характеризуют оптимальные (наилучшие) значения пластичности ψ_k и механической стабильности K_{ms} КС при заданной прочности $\sigma_{0,2}$, другими словами, ψ_k и K_{ms} принимают оптимальные значения (ψ_k^{opt} и K_{ms}^{opt}) на кривых оптимизации при заданной прочности $\sigma_{0,2}$. Следует заметить, что величина K_{ms}^{opt} всегда максимальна для заданной прочности (см. рис. 2), при этом пластичность ψ_k^{opt} принимает максимальное значение только для КС 1-го вида на уровнях $K_{ms} \geq 1,7$ (см. рис. 2, а). С другой стороны, заданная прочность $\sigma_{0,2}$ на кривых оптимизации всегда будет иметь максимальное значение для каждого уровня K_{ms} (см. рис. 2). Таким образом, отношения пластичности ψ_k и механической стабильности K_{ms} к их оптимальным значениям ψ_k^{opt} и K_{ms}^{opt} на кривых оптимизации при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$ можно рассматривать как показатели качества КС. При этом сочетание характеристик ψ_k^{opt} и K_{ms}^{opt} при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$ характеризует высшее качество металла и дает возможность в инженерной практике выбрать или заказать такой сплав, который по своим свойствам наиболее близок к указанным оптимальным механическим характеристикам.

Кривые оптимизации 1 и 2 (см. рис. 2) построены на основе данных экспериментально исследованной выборки комплекса механических свойств КС в свой-

ственном для этих сплавов диапазоне изменения механической стабильности $1,05 \leq K_{ms} \leq 3,5$ и имеют аналитическое описание.

Кривая оптимизации 1, ограничивающая максимальные значения прочности $\sigma_{0,2}$ на каждом фиксированном уровне механической стабильности K_{ms} обобщенной диаграммы зависимостей $\psi_k = f(\sigma_{0,2})$ для КС 1-го вида (см. рис. 2, а), может быть аппроксимирована гиперболической функцией

$$\psi_k^{opt} = a - \frac{b}{(1 + c\sigma_{0,2})^d}, \quad (7)$$

где $a = 90,855$; $b = 2,169$; $c = 5,40 \cdot 10^{-4}$ [МПа⁻¹]; $d = -4,673$ — эмпирические коэффициенты. Аналогичная кривая оптимизации 2 для КС 2-го вида (см. рис. 2, б) аппроксимируется функцией того же вида, но с другими эмпирическими коэффициентами:

$$a = 78,868; b = 0,015; c = 6,72 \cdot 10^{-3} \text{ [МПа}^{-1}\text{]}; d = -2,886. \quad (8)$$

Закономерность изменения значений пластичности ψ_k^{opt} от механической стабильности K_{ms}^{opt} для кривой оптимизации 1 (см. рис. 2, а) может быть аппроксимирована S-образной функцией Ричардса [25]

$$\psi_k^{opt} = a \{ 1 + (d-1) \exp[-b(K_{ms}^{opt} - c)] \}^{1/(1-d)}, \quad (9)$$

где $a = 86,106$; $b = 2,991$; $c = 1,269$; $d = 0,486$ — эмпирические коэффициенты, а для кривой оптимизации 2 (см. рис. 2, б) — экспоненциальной функцией

$$\psi_k^{opt} = a - b \exp(cK_{ms}^{opt}), \quad (10)$$

где $a = 78,792$; $b = 1132,775$; $c = -2,550$ — эмпирические коэффициенты.

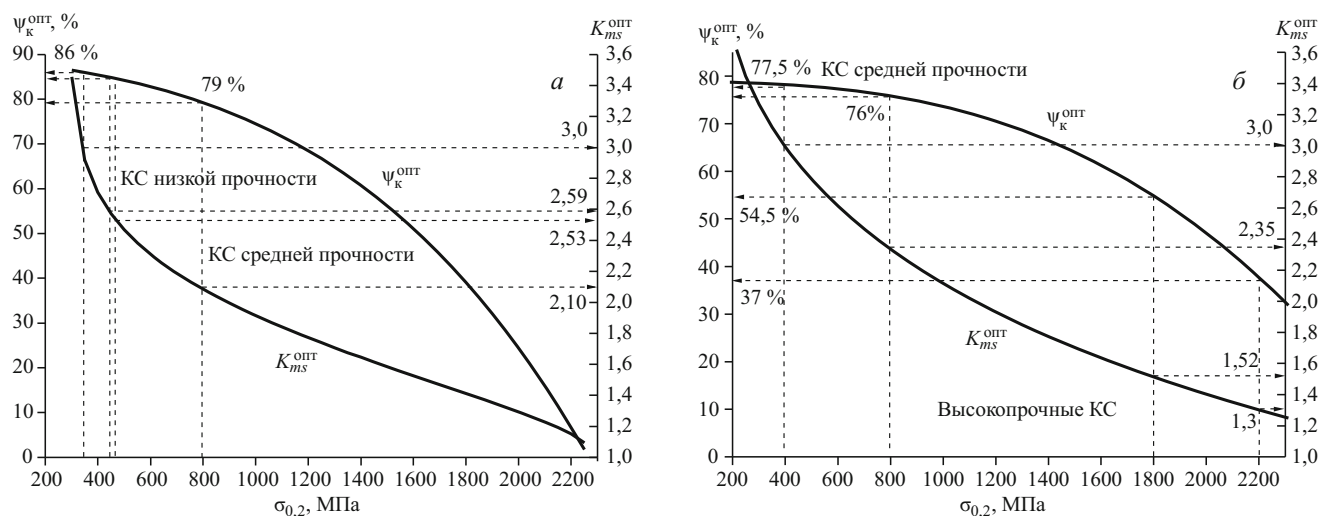


Рис. 4. Функциональные зависимости оптимальных значений пластичности $\psi_k^{\text{опт}}$ и механической стабильности $K_{ms}^{\text{опт}}$ от уровня прочности $\sigma_{0,2}$ для КС 1-го (а) и 2-го (б) видов

Представленные на рис. 2, а зависимости $\psi_k = f(\sigma_{0,2})$ вида 1 при $K_{ms} = \text{const}$ имеют максимумы во всем реальном для КС диапазоне изменения характеристики механической стабильности. Смысл таких максимумов заключается в наличии определенного значения $\sigma_{0,2}$, при котором некоторые КС имеют максимальную пластичность $\psi_k^{\text{макс}}$ при заданном уровне K_{ms} . С повышением прочности сплавов $\sigma_{0,2}$ и с естественным при этом понижением максимального уровня пластичности $\psi_k^{\text{макс}}$ возрастает склонность металла к хрупкости, т.е. происходит потеря сопротивляемости переходу в хрупкое состояние вследствие снижения уровня механической стабильности K_{ms} . При этом характерной особенностью зависимостей $\psi_k = f(\sigma_{0,2})$ для сплавов 1-го вида является некоторое снижение пластичности ψ_k с увеличением прочности в интервале от $\sigma_{0,2}$, соответствующего значению $\psi_k^{\text{макс}}$, до величины $\sigma_{0,2}^{\text{макс}}$ на кривой оптимизации 1 при заданном уровне K_{ms} , что наблюдается во всем исследованном интервале изменения $1,1 \leq K_{ms} \leq 3,5$ (см. рис. 2, а). В то же время зависимости $\psi_k = f(\sigma_{0,2})$ для сплавов 2-го вида при $K_{ms} = \text{const}$ (см. рис. 2, б) иные: они характеризуются наличием минимумов в интервале изменения $1,05 \leq K_{ms} \leq 3,0$. Смысл наличия таких минимумов заключается в определенном значении $\sigma_{0,2}$, при котором некоторые сплавы имеют минимальный уровень пластичности $\psi_k^{\text{макс}}$ при заданном уровне K_{ms} , при этом, как и в первом случае, при повышении прочности сплавов $\sigma_{0,2}$ и понижении уровня $\psi_k^{\text{макс}}$ неизбежно происходит потеря сопротивляемости переходу в хрупкое состояние вследствие снижения уровня механической стабильности K_{ms} . Характерной особенностью зависимостей $\psi_k = f(\sigma_{0,2})$ для сплавов 2-го вида является некоторое повышение пластичности ψ_k с увеличением прочности в интервале от $\sigma_{0,2}^{\text{мин}}$, соот-

ветствующего значению $\psi_k^{\text{мин}}$, до величины $\sigma_{0,2}^{\text{макс}}$ на кривой оптимизации 2 при заданном уровне K_{ms} , что наблюдается во всем указанном интервале изменения механической стабильности (см. рис. 2, б). Вопрос о причинах существования двух видов зависимостей $\psi_k = f(\sigma_{0,2})$ при условии $K_{ms} = \text{const}$, носящих для металлических конструкционных сплавов параболический характер, частично обсуждался в работе [13]. В целом этот вопрос требует отдельного рассмотрения, которое выходит за рамки данной работы.

Используя уравнения (7), (9) и упрощая эмпирические коэффициенты, можно получить функциональную зависимость оптимального значения механической стабильности от прочности $\sigma_{0,2}$ для КС 1-го вида:

$$K_{ms}^{\text{опт}} = a - b \ln \left\{ 1 - c \left[d - \frac{f}{(1 + k\sigma_{0,2})^m} \right]^n \right\}, \quad (11)$$

где $a = 1,046$; $b = 0,334$; $c = 0,101$; $d = 90,855$; $f = 2,169$; $k = 5,40 \cdot 10^{-4}$ [МПа $^{-1}$]; $m = -4,673$; $n = 0,514$ — эмпирические коэффициенты. Прделав те же операции с уравнениями (8) и (10), получим аналогичную зависимость для КС 2-го вида:

$$K_{ms}^{\text{опт}} = a \ln \left[b + \frac{c}{(1 + d\sigma_{0,2})^m} \right], \quad (12)$$

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

Функциональные зависимости $\psi_k^{\text{опт}} = f(\sigma_{0,2})$ и $K_{ms}^{\text{опт}} = f(\sigma_{0,2})$ для обоих видов КС представлены на рис. 4. С учетом отмеченных ранее (см. рис. 3) интервалов изменения значений прочности $\sigma_{0,2}$, для которых характерны оптимальные характеристики пластичности $\psi_k^{\text{опт}}$ и механической стабильности $K_{ms}^{\text{опт}}$, а также

зависимостей (7), (11) и (8), (12) для сплавов 1-го и 2-го видов соответственно можно выделить области с наивысшими показателями качества КС в системе взаимосвязи свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» (см. рис. 4). Так, для наилучших сплавов

1-го вида низкой прочности ($\sigma_{0,2}$ от 350 до 450 МПа) показатели пластичности должны варьироваться в пределах $84,0\% \leq \psi_k \leq 86,0\%$, а механической стабильности — в пределах $2,59 \leq K_{ms} \leq 3,0$ (см. рис. 4, а);

1-го вида средней прочности ($\sigma_{0,2}$ от 460 до 800 МПа) показатели пластичности должны находиться в пределах $79,0\% \leq \psi_k \leq 83,8\%$, а механической стабильности — в пределах $2,10 \leq K_{ms} \leq 2,53$ (см. рис. 4, а);

2-го вида низкой и средней прочности ($\sigma_{0,2}$ от 400 до 800 МПа) показатели пластичности должны изменяться в пределах $76,0\% \leq \psi_k \leq 77,5\%$, а механической стабильности — в пределах $2,35 \leq K_{ms} \leq 3,0$ (см. рис. 4, б);

высокопрочных 2-го вида ($\sigma_{0,2}$ от 1800 до 2200 МПа) показатели пластичности должны варьироваться в пределах $37,0\% \leq \psi_k \leq 54,5\%$, а механической стабильности — в пределах $1,30 \leq K_{ms} \leq 1,52$ (см. рис. 4, б).

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 2 для различных уровней $K_{ms} = \text{const}$ и полученных на основании достаточно большой выборки экспериментальных данных, позволяет сделать ряд практических заключений:

значение K_{ms} как параметра, характеризующего уровень механической стабильности металла, можно поддерживать на достаточно высоком уровне ($K_{ms} = \text{const}$) при различных сочетаниях значений прочности $\sigma_{0,2}$ и пластичности ψ_k , обеспечивающем надежную защиту от хрупкого разрушения;

при увеличении прочности металла $\sigma_{0,2}$ с целью недопущения хрупкости следует соблюдать условие $K_{ms} = \text{const}$, повышая при этом значение хрупкой прочности R_{mc} и/или снижая показатель деформационного упрочнения n , так как перечисленные характеристики связаны соотношением (1);

зависимости $\psi_k = f(\sigma_{0,2})$ при $K_{ms} = \text{const}$ (см. рис. 2) показывают возможность получения одинакового уровня пластичности ψ_k для сплавов как низкой прочности, так и высокопрочных КС при сохранении их способности сопротивляться хрупкому разрушению, а также определяют необходимое сочетание механических свойств, при котором реализуется эта возможность; соотношения между прочностью $\sigma_{0,2}$ и пластичностью ψ_k при $K_{ms} = \text{const}$ можно рассматривать как показатели качества металла;

характеристика ψ_k не дает однозначного представления о хрупкости металла — хрупкость вызывается потерей механической стабильности K_{ms} .

В таблице приведены результаты оценки точности аппроксимации корреляционных зависимостей $\psi_k^{\text{опт}} = f(\sigma_{0,2})$ и $K_{ms}^{\text{опт}} = f(\sigma_{0,2})$, используемых для оптимизации свойств КС. Видно, что точность аппроксимации зависимостей (7) – (10), при которой выборочный стандарт не превышает 1,5 % с достоверностью не ниже 0,918 в максимальном доверительном интервале $\pm 2,5\%$, позволяет использовать эти зависимости для дальнейших заключений и прикладных расчетов.

Статистический анализ исследованной выборки КС показывает, что точность всех полученных зависимостей и оценочных результатов может отличаться от соответствующих факторов предполагаемой генеральной (полной) совокупности этих сплавов на величину, не превосходящую $\pm \frac{1}{\sqrt{n}} = \frac{1}{\sqrt{1500}} \approx \pm 2,58\%$, где n — количество измерений комплекса механических характеристик КС.

Отметим, что принцип построения обобщенной диаграммы взаимосвязи свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» КС имеет системный характер, а точность этого построения достаточна для практического использования. Следовательно, можно говорить о том, что обобщенная диаграмма представляет собой систему взаимосвязи свойств $\psi_k - \sigma_{0,2} - K_{ms}$ конструкционных сталей.

Таким образом, взаимосвязь свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» конструкционных сталей может быть количественно описана с помощью параболических уравнений регрессии $\psi_k = f(\sigma_{0,2})$ при условии $K_{ms} = \text{const}$, которые в зависимости от типа экстремума можно разделить на два

Оценка точности аппроксимации зависимостей (7) – (10)

Номер зависимости	Зависимость	$s, \%$	ДИ, %	P
(7)	$\psi_k^{\text{опт}} = a - \frac{b}{(1 + c\sigma_{0,2})^d}$	1,44	$\pm 2,5$	0,918
(8)	$\psi_k^{\text{опт}} = a - \frac{b}{(1 + c\sigma_{0,2})^d}$	1,37	$\pm 2,5$	0,931
(9)	$\psi_k^{\text{опт}} = a \left\{ 1 + (d-1) \exp[-b(K_{ms}^{\text{опт}} - c)] \right\}^{1/(1-d)}$	0,55	$\pm 1,0$	0,931
(10)	$\psi_k^{\text{опт}} = a - b \exp(cK_{ms}^{\text{опт}})$	0,72	$\pm 1,5$	0,962

Примечание: s — выборочный стандарт; ДИ — доверительный интервал; P — достоверность.

вида. 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} .

Отношения характеристик пластичности ψ_k и механической стабильности K_{ms} к их оптимальным значениям $\psi_k^{\text{опт}}$ и $K_{ms}^{\text{опт}}$ на кривых оптимизации при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$ можно рассматривать как показатели качества конструкционных сталей. При этом сочетание характеристик $\psi_k^{\text{опт}}$ и $K_{ms}^{\text{опт}}$ при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$ характеризует наилучшее качество металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях / Под ред. Г. С. Писаренко. — Киев: Наукова думка, 1980. Т. 1, 2.
2. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. — М.: Машиностроение, 1985. — 223 с.
3. Кошелев П. Ф., Беляев С. Е. Прочность и пластичность конструкционных материалов при низких температурах. — М.: Машиностроение, 1967. — 315 с.
4. Ударные испытания металлов / Пер. с англ.; под ред. Б. А. Дроздовского, Е. М. Морозова. — М.: Мир, 1973. — 318 с.
5. Механика разрушения и прочность материалов: справочное пособие / Под ред. В. В. Панасюка. — Киев: Наукова думка, 1988. Т. 1 — 4.
6. Браун У., Строули Дж. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации / Пер. с англ.; под ред. Б. А. Дроздовского, Е. М. Морозова. — М.: Мир, 1972. — 246 с.
7. Котречко С. А., Мешков Ю. Я. Новые подходы к оценке комплекса механических свойств конструкционных сталей / Металлофизика и новейшие технологии. 2009. Т. 31. № 3. С. 367 — 380.
8. Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Шиян А. В. Пластичность и хладостойкость конструкционных сталей / Проблемы прочности. 2010. № 1. С. 112 — 119.
9. Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Шиян А. В. Механическая стабильность — универсальная мера сопротивления переходу в хрупкое состояние металла / Успехи физики металлов. 2009. Т. 10. № 2. С. 207 — 228.
10. Котречко С. А., Мешков Ю. Я. Предельная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции. — Киев: Наукова думка, 2008. — 295 с.
11. Котречко С. А., Мешков Ю. Я. Концепция механической стабильности конструкционных сталей / Проблемы прочности. 2009. № 2. С. 55 — 78.
12. Шиян А. В. Физическое обоснование критерия классификации конструкционных сталей по прочности / Металлофизика и новейшие технологии. 2011. Т. 33. № 12. С. 1703 — 1716.
13. Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Шиян А. В., Стеценко Н. Н. Новые подходы к оценке взаимосвязи свойств прочности, пластичности и механической стабильности / Металлофизика и новейшие технологии. 2011. Т. 33. № 9. С. 1277 — 1290.
14. Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Шиян А. В., Сорока К. Ф., Носенко О. П. Связь величины равномерной деформации с основными механическими характеристиками конструкционных сталей при одноосном растяжении / Сталь. 2013. № 2. С. 58 — 62.
15. Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Шиян А. В., Сорока К. Ф., Носенко О. П. Закономерности изменения показателя деформационного упрочнения конструкционных сталей при деформациях, больших равномерной / Сталь. 2013. № 6. С. 70 — 76.
16. Шиян А. В. Определение характеристик хрупкой прочности и механической стабильности конструкционных сталей / Металл. 2012. № 3 — 4. С. 29 — 56.
17. Мешков Ю. Я., Сердитова Т. Н. Разрушение деформированной стали. — Киев: Наукова думка, 1989. — 160 с.
18. Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях / Под ред. Г. С. Писаренко. — Киев: Наукова думка, 1980. Т. 1, 2.
19. Кошелев П. Ф., Беляев С. Е. Прочность и пластичность конструкционных материалов при низких температурах. — М.: Машиностроение, 1967. — 315 с.
20. Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие / Под ред. В. В. Панасюка. — Киев: Наукова думка, 1988. Т. 1 — 4.
21. Сорокин В. Г., Гервасьев М. А., Палеев В. С., Гервасьева И. В., Палеева С. Я. Стали и сплавы. Марочник. — М.: Интермет Инжиниринг, 2001. — 608 с.
22. Шмыков А. А. Справочник термиста. 4-е изд. — М.: Машгиз, 1961. — 392 с.
23. Тылкин М. А. Справочник термиста ремонтной службы. — М.: Металлургия, 1981. — 648 с.
24. Мешков Ю. Я., Котречко С. А., Шиян А. В., Большаков В. И., Носенко О. П., Мурашкин А. В. Новый подход к оценке качества конструкционных сталей / Сталь. 2012. № 8. С. 66 — 71.
25. Seber G. A. F., Wild C. J. Nonlinear Regression. — John Wiley & Sons, 1989. P. 332 — 337.