

## PHYSICS OF STRENGTH AND PLASTICITY

PACS numbers: 46.50.+a, 61.82.Bg, 62.20.fk, 62.20.mj, 62.20.mm, 62.20.mt

### Оценка конструкционной пригодности сталей, используемых в ядерной энергетике

А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков

*Институт металлофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,  
бульв. Академіка Вернадського, 36,  
03142 Київ, Україна*

Для нужд ядерной энергетике разработана методика прогнозирования температуры хрупкости (референсной температуры)  $T_0$ . В рамках концепции конструкционной пригодности металлов и сплавов разработана методология расчёта величины коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Q(CT)}$  при комнатной температуре  $T_K$  (293 K) по результатам испытаний стандартных гладких образцов на одноосное растяжение. Проведена оценка конструкционной пригодности сталей, используемых в ядерной энергетике. Установлено принципиально важное научное положение в области материаловедения механических свойств о том, что все конструкционные стали можно разделить на два вида по поведению механических характеристик, которое отличается по признаку характера изменения зависимости показателей пластичности  $\psi_K$  от уровня прочности  $\sigma_{0.2}$  при условии постоянства механической стабильности  $K_{ms}$  или деформационной стойкости (изломостойкости)  $B_r$ . Это обстоятельство, в свою очередь, приводит к формированию разных видовых переходов при разных температурах испытаний, поэтому без учета указанных факторов никакое описание взаимосвязи между сложными (комплексными) параметрами сплавов и их простыми (базовыми) характеристиками, а также этих параметров между собой не представляется возможным.

**Ключевые слова:** охрупчивание, деформационная стойкость, изломостойкость, референсная температура, коэффициент интенсивности на-

---

Corresponding author: Artur Vitaliyovych Shiyanyan  
E-mail: shiyany\_av@ukr.net

*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine  
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Citation: A. V. Shiyanyan and Yu. Ya. Meshkov, Evaluation of Construction Suitability of Steels Used in Nuclear Power Engineering, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 6: 775–803 (2019) (in Russian), DOI: [10.15407/mfint.41.06.0775](https://doi.org/10.15407/mfint.41.06.0775).

пращений, конструкционная пригодность.

Для потреб ядерної енергетики розроблено спрощену методику прогнозування температури крихкості (референсної температури)  $T_0$ . В межах концепції конструкційної придатності металів і сплавів розроблено методологію розрахунку величини коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_{Q(IC)}$  при кімнатній температурі  $T_K$  (293 К) за результатами випробувань стандартних гладких зразків на одновісне розтягання. Проведено оцінювання конструкційної придатності сталей, які використовуються в ядерній енергетиці. Встановлено принципово важливе наукове положення в області матеріалознавства механічних властивостей про те, що усі конструкційні сталі можна розділити на два види за поведінкою механічних характеристик, яка відрізняється за ознакою характеру зміни залежності показників пластичності  $\psi_K$  від рівня міцності  $\sigma_{0,2}$  за умови сталості механічної стабільності  $K_{ms}$  або деформаційної стійкості (зламоустійкості)  $B_r$ . Ця обставина, в свою чергу, призводить до формування різних видових переходів при різних температурах випробувань, тому без урахування означених факторів ніяке описання взаємозв'язку між складними (комплексними) параметрами сплавів та їх простими (базовими) характеристиками, а також цих параметрів між собою є неможливим.

**Ключові слова:** окрихчення, деформаційна стійкість, зламоустійкість, референсна температура, коефіцієнт інтенсивності напружень, конструкційна придатність.

For the needs of nuclear power engineering, a methodology of predicting the temperature of brittleness (reference temperature)  $T_0$  is developed. Within the framework of the concept of structural suitability of metals and alloys, a methodology of the stress intensity factor  $K_{Q(IC)}$  value calculation at room temperature  $T_K$  (293 K) from the results of standard smooth samples testing under uniaxial tension is developed. The structural suitability of steels used in nuclear power engineering is assessed. A fundamentally important scientific position is established in the field of the material science concerning mechanical properties, *i.e.*, all structural steels can be divided into two types according to mechanical characteristics' behaviour that differs in terms of a character of change in the dependence of the ductility indices  $\psi_K$  on the strength level  $\sigma_Y$ , provided that the mechanical stability  $K_{ms}$  or the deformation endurance (break resistance)  $B_r$  are constant. This circumstance, in turn, leads to the formation of different species' transitions at different test temperatures. Therefore, without considering these factors, any description of the relationships between complex parameters of alloys and simple (basic) characteristics as well as between these parameters themselves is not possible.

**Key words:** embrittlement, deformation endurance, break resistance, reference temperature, stress intensity factor, structural suitability.

(Получено 3 октября 2018 г.; окончат. вариант — 20 февраля 2019 г.)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Для оценки целостности корпуса реактора в ядерной энергетике используют методику «Мастер кривой», согласно которой определяют температуру хрупкости (далее — референсную температуру — от англ. Reference Temperature)  $T_0$ , при которой вязкость разрушения  $K_{JC}$  для образцов конструкционных сталей (КС) толщиной 25 мм равняется  $100 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$  [1]. Таким образом, стандарт [1] регламентирует определение эквивалента коэффициента интенсивности напряжений (КИН) (вязкости разрушения)  $K_{JC}$  при  $T_0$  по результатам испытаний стандартных плоских прямоугольных образцов с краевой усталостной трещиной на трёхточечный изгиб или внецентренное растяжение (испытания на трещиностойкость при статическом нагружении согласно [2]). В работах [3–5] в своё время были предприняты попытки упростить вышеуказанные технически сложные и дорогостоящие испытания на трещиностойкость более простыми. В работе [3] авторы попытались заменить испытания образцов с усталостной трещиной ( $25 \times 50 \times 240 \text{ мм}^3$ ) на трёхточечный изгиб более простыми испытаниями на одноосное растяжение цилиндрических образцов с кольцевыми концентраторами напряжений (КН) и найти корреляцию между температурой хрупкости  $T_C$ , которую определяли в результате таких испытаний по условию  $\sigma_{GY} = \sigma_{NF}$  (где  $\sigma_{GY}$  — напряжение общей текучести образца с КН,  $\sigma_{NF}$  — среднее номинальное напряжение разрушения образца с КН (несущая способность (НС)) при испытаниях на одноосное квазистатическое растяжение, с референсной температурой  $T_0$ ).

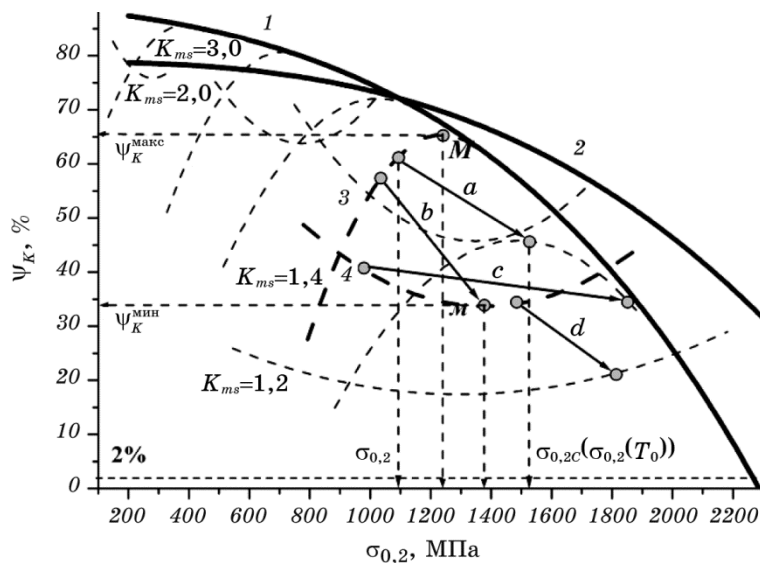
Авторы [3] констатировали удовлетворительную корреляцию между знаковыми температурами  $T_0$  и  $T_C$ , но полученная ими зависимость, к сожалению, неприменима в качестве расчётной для достаточно точного определения референсной температуры  $T_0$ . Отсутствие достаточного уровня корреляции между температурами  $T_0$  и  $T_C$  для удовлетворительного расчёта  $T_0$  отметил также автор [4]. В работе [5] была предпринята попытка поиска корреляции между референсной температурой  $T_0$  и величиной остаточной механической стабильности  $P_{ms}$  при  $T_0$  [6, 7]. Такая корреляция была найдена, но только для некоторых КС из [3], а причина выборочного корректного расчёта  $T_0$  заключалась в отсутствии учёта вида поведения механических характеристик сплавов в начальных и конечных условиях действия КН (рис. 1), т.е. видовых переходов (ВП) между комнатной ( $T_K$ ) и референсной ( $T_0$ ) температурами [7–9].

Принадлежность данного сплава к определенному виду поведения механических характеристик и изменение (или сохранение) такой видовой принадлежности — ВП в условиях действия неоднородных силовых полей (НСП) (рис. 2) являются важнейшими факторами, регулирующими закономерности взаимосвязи простых

(базовых) характеристик со сложными (комплексными) [8, 9].

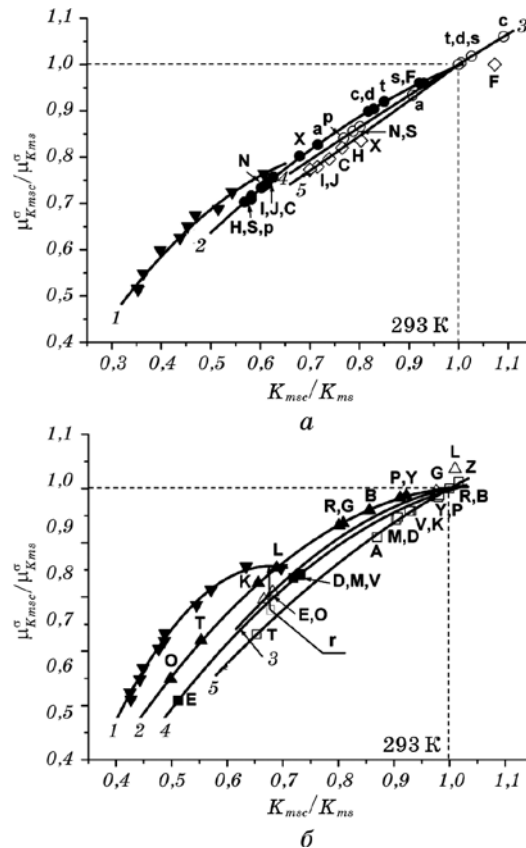
Таким образом, сохранение вида поведения механических характеристик сплава в условиях действия на металл НСП по отношению к его исходному состоянию характеризуется ВП 1-1 и 2-2, а изменение видовой принадлежности в этих условиях — ВП 1-2 и 2-1.

Факт проявления видовой принадлежности и ВП конструкционных сплавов необходимо учитывать в расчётах ожидаемых последствий от их охрупчивания. Без учёта начального (при  $T_K = 293$  К) вида сплава и его ВП разработка предлагаемой в настоящей работе расчётной методологии не представляется возможной.



**Рис. 1.** Система взаимосвязи комплекса механических свойств «пластичность  $\psi_K$  — прочность  $\sigma_{0,2}$  — механическая стабильность  $K_{ms}$ » КС [7–9]: кривые оптимизации для 1 — сплавов 1-го вида, 2 — сплавов 2-го вида, параболические зависимости  $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$  при  $K_{ms} = \text{const}$  (штриховые линии), 3 — выпуклые для сплавов 1-го вида с наличием максимумов «М» ( $\sigma_{0,2}^{\text{макс}}$ ;  $\psi_K^{\text{макс}}$ ), 4 — вогнутые для сплавов 2-го вида с наличием минимумов «м» ( $\sigma_{0,2}^{\text{мин}}$ ;  $\psi_K^{\text{мин}}$ ); ВП (стрелки): а — ВП 1-1, b — ВП 1-2, c — ВП 2-1, d — ВП 2-2. Прочности:  $\sigma_{0,2}$  — исходная при  $T_K$  (293 К), конечная  $\sigma_{0,2C}$  или  $\sigma_{0,2}(T_0)$  — при  $T_C$  или  $T_0$ .

**Fig. 1.** The system of interrelation of a complex of mechanical properties 'plasticity  $\psi_K$ —strength  $\sigma_{0,2}$ —mechanical stability  $K_{ms}$ ' KS [7–9]: optimization curves for 1—alloys of the 1-st type, 2—alloys of the 2-nd type, parabolic curves  $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$  at  $K_{ms} = \text{const}$  (dashed lines), 3—convex for alloys of the 1-st type with the presence of maxima 'M' ( $\sigma_{0,2}^{\text{макс}}$ ;  $\psi_K^{\text{макс}}$ ), 4—concave for alloys of the 2-nd type with the presence of minima 'm' ( $\sigma_{0,2}^{\text{мин}}$ ;  $\psi_K^{\text{мин}}$ ); ВП (arrows): a—ВП 1-1, b—ВП 1-2, c—ВП 2-1, d—ВП 2-2. Strength:  $\sigma_{0,2}$ —initial at  $T_K$  (293 К), final  $\sigma_{0,2C}$  or  $\sigma_{0,2}(T_0)$ —at  $T_C$  or  $T_0$ .



**Рис. 2.** Модельные закономерности структурно-механического охрупчивания КС в виде отношения показателей конструкционного и механического качества  $\mu_{K_{msc}}^\sigma / \mu_{K_{ms}}^\sigma$  от отношения соответствующих величин механической стабильности  $K_{msc} / K_{ms}$  при критических температурах  $T_{\text{BX}}$  (вязко-хрупкого перехода для образцов без КН [6]),  $T_c$ ,  $T_0$  и  $T_K$  [7–9]: *a* — 1-го и *б* — 2-го начальных видов поведения механических характеристик; образцы: 1 — без КН ( $\blacktriangledown$ ); с КН типа К1: 2 — ВП 1-1 ( $\bullet$ ), ВП 2-1 ( $\blacktriangle$ ), 4 — ВП 2-2 ( $\blacksquare$ ); с КН типа К2: 3 — ВП 1-1 ( $\circ$ ), ВП 2-1 ( $\triangle$ ), 5 — ВП 1-2 ( $\diamond$ ), ВП 2-2 ( $\square$ ); буквы латинской — обозначения КС (табл. 1 [3]).

**Fig. 2.** The model regularities of structural and mechanical embrittlement of copolymers in the form of a ratio of structural and mechanical quality  $\mu_{K_{msc}}^\sigma / \mu_{K_{ms}}^\sigma$  from the ratio of the corresponding values of the mechanical stability of  $K_{msc} / K_{ms}$  at critical temperatures of  $T_{\text{BX}}$  (viscous-brittle transition for samples without KN [6]),  $T_c$ ,  $T_0$  and  $T_K$  [7–9]: *a*—1-st and *б*—2-nd initial types of behaviour of mechanical characteristics; samples: 1—without KN ( $\blacktriangledown$ ); with KN type K1: 2—VP 1-1 ( $\bullet$ ), VP 2-1 ( $\blacktriangle$ ), 4—VP 2-2 ( $\blacksquare$ ); with KN type K2: 3—VP 1-1 ( $\circ$ ), VP 2-1 ( $\triangle$ ), 5—VP 1-2 ( $\diamond$ ), VP 2-2 ( $\square$ ); letters of Latin—designation of KS (Table 1 [3]).

Поэтому далее мы будем обозначать ВП цифрами, начиная от исходной комнатной температуры  $T_K$ , и далее — по направлению от более высоких температур к более низким на температурной зависимости прочности  $\sigma_{0,2}(T)$  в зависимости от их комбинаций, например, ВП 1-1 — от  $T_K$  к  $T_C$ , ВП 1-2-2 —  $T_K-T_0-T_C$  и т.п.

Ранее в работах [8, 9] нами была разработана методика прогнозирования референсной температуры  $T_0$  с использованием закономерностей структурно-механического охрупчивания (кривые 3, 5 на рис. 2, а, б) и учётом ВП между температурами  $T_K-T_0$  для предварительного расчёта показателя прочности  $\sigma_{0,2}(T_0)$  с использованием системы уравнений

$$I = K_{ms}^{\text{опт}}, \quad II = K_{ms}^{\text{опт}}(T_0)\sigma_2(T_0)(A + BY - CY^2)/\sigma_2, \quad (1)$$

где  $X = \sigma_2/\sigma_2(T_0)$ ,  $\sigma_2(T_0) = \sigma_2/(a + bY - cY^2)$ ,  $Y = [\sigma_{0,2}/\sigma_{0,2}(T_0)] \times [\sigma_2^{\text{опт}}/\sigma_2^{\text{опт}}(T_0)]$ ;  $A, B, C, a, b, c$  — эмпирические коэффициенты, зависящие от ВП,  $\sigma_2, \sigma_2(T_0)$  — прочности металла в пластическом состоянии при критической степени деформации  $e_c \approx 2\%$  при  $T_K$  и  $T_0$  соответственно [6];  $\sigma_2^{\text{опт}}, \sigma_2^{\text{опт}}(T_0)$  — оптимальные (наилучшие) значения указанных характеристик при  $T_K$  и  $T_0$  соответственно,  $K_{ms}^{\text{опт}}, K_{ms}^{\text{опт}}(T_0)$  — оптимальные (наилучшие) значения характеристик механической стабильности при  $T_K$  и  $T_0$  соответственно [7, 8],  $\sigma_{0,2}, \sigma_{0,2}(T_0)$  — условные пределы текучести (показатели прочности) при  $T_K$  и  $T_0$  соответственно.

Информация о величине  $\sigma_{0,2}(T_0)$  даёт возможность определить значение  $T_0$  на температурной зависимости прочности  $\sigma_{0,2}(T)$  по формуле<sup>1</sup>:

$$\sigma_{0,2}(T) = \sigma_{0,2}(T_K) + C_1 \exp[-(C_2 - C_3 \ln \dot{\epsilon})T] - C_1 \exp[-(C_2 - C_3 \ln \dot{\epsilon})T_K], \quad (2)$$

где  $\dot{\epsilon}$  — скорость деформации (при квазистатическом растяжении:  $\dot{\epsilon} = 0,0004 \text{ с}^{-1}$ ,  $C_3 = 0,000415$  — константа);  $\sigma_{0,2}(293)$  — условный предел текучести при комнатной температуре  $T_K = 293 \text{ К}$ , МПа,  $C_1$  — коэффициент, который характеризует напряжение Пайерлса-Набарро, необходимое для термического преодоления барьеров максимальной высоты, МПа,  $C_2$  — коэффициент, который зависит от плотности дислокаций и длины дислокационных сегментов [10].

Эта методика пригодна для предварительной приближённой оценки величин  $\sigma_2(T_0)$ ,  $\sigma_{0,2}(T_0)$ ,  $K_{ms}(T_0)$  и  $T_0$ , но является достаточно сложной, т.к. связана с необходимостью использования специальных программ для проведения расчётов.

Таким образом, задачей настоящей работы является разработка методологий для упрощённого прогнозирования температуры

<sup>1</sup>Зависимость (2) модифицирована зав. отделом № 48 Института металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины д.ф.-м.н, проф. Котречко С. А.

хрупкости (референсной температуры)  $T_0$  и коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Q(IC)}$  при комнатной температуре  $T_K$ , а, на основе полученных зависимостей механических свойств, проведение оценки конструкционной пригодности сталей, используемых в ядерной энергетике. Ниже мы предложим методологию максимально точного и относительно простого прогнозирования показателей  $\sigma_{0,2}(T_0)$ ,  $T_0$  для КС, а также производных от них характеристик в концепции конструкционной пригодности металлов и сплавов ( $S_K(T_0)$ , характеристик деформационной стойкости (изломостойкости)  $B_r(T_0)$ ,  $B_{rc0}$ ,  $B_{rc0}(T_0)$  и показателей конструкционной пригодности  $P_{me}(T_0)$ ,  $P_{meC0}(T_0)$ ) [21] соответственно при  $T_K$  и  $T_0$ :

$$B_r(T_0) = S_K(T_0)/\sigma_{0,2}(T_0), B_{rc0} = \sigma_{C0}/\sigma_{0,2}, B_{rc0}(T_0) = \sigma_{C0}(T_0)/\sigma_{0,2}(T_0), \quad (3)$$

$$P_{me}(T_0) = B_r/B_r(T_0), P_{meC0}(T_0) = B_{rc0}/B_{rc0}(T_0), \quad (4)$$

где  $\sigma_{C0}$  — номинальное разрушающее напряжение по ослабленному сечению образца (несущая способность) при испытаниях на трещиностойкость [2].

## 2. МАТЕРИАЛЫ

В качестве объектов анализа выбирали КС, которые относятся к разным классам по прочности, структурному состоянию, качеству, химическому составу и используются для создания изделий и элементов конструкций в ядерной энергетике, в том числе, корпуса реактора [3].

Для полноты анализа при определении референсной температуры  $T_0$  использовали экспериментальные данные из литературных источников [12–17], а при определении коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Q(IC)}$  при  $T_K$  — данные из литературных источников [12–14, 18–20]. Базовые механические характеристики исследованных КС соответственно представлены в табл. 1–3.

В настоящей работе были использованы результаты испытаний следующих образцов: стандартных цилиндрических гладких для определения базовых механических характеристик при одноосном растяжении в температурном интервале от 293 К до 77 К; цилиндрических с кольцевым КН ( $D = 12$  мм,  $t = 2,0$  мм — далее КН типа К1 — «регулярный» КН, где  $D$  — внешний диаметр образца,  $t$  — глубина надреза,  $r = 0,25$  мм, угол надреза  $45^\circ$ ) на одноосное растяжение в температурном интервале от 293 К до 77 К для определения механических характеристик при ТС [3]; стандартных плоских прямоугольных образцов с краевой усталостной трещиной на внецентренное растяжение или трёхточечный изгиб (далее — КН типа К2 на образцах  $25 \times 50 \times 240$  мм<sup>3</sup> для определения референсной тем-

**ТАБЛИЦА 1.** Значения исходных базовых механических характеристик  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ,  $\psi_K$ ,  $R_X$ ,  $S_K$  КС по данным [3] в условиях одноосного растяжения при 293 К.

**TABLE 1.** The values of the initial basic mechanical characteristics of  $\sigma_Y$ ,  $\sigma_B$ ,  $\psi_K$ ,  $R_X$  and  $S_K$  given in [3] under conditions of uniaxial tension at 293 K.

[3]	КС [3]	Структурное состояние	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\psi_K$ , %	$R_X$ , МПа [11]	$S_K$ , МПа
J	10Ch2MFA		491	606	78,8	1327	1476
X			607	708	77,4	1452	1637
Y	15Ch2NMFAA	Отпущенный	842	928	48,9	1545	1619
Z		бейнит–мартенсит	934	1091	30,9	1564	1418
M	20CrNiMoV		676	801	56,7	1373	1278
V			678	796	63,5	1463	1414
K	42CrMo4	Бейнит	524	747	67,9	1550	1476
L		Перлит–феррит	376	708	56,4	1364	1212
R	45Mn	Перлит	565	894	57,1	1638	1494
c		Отпущенный	513	673	54,1	1071	1099
d		бейнит	496	642	63,7	1209	1229
D	CrMoV	Бейнит–мартенсит	708	843	68,3	1606	1596
F		Отпущенный	779	904	63,2	1592	1605
G		бейнит	502	681	65,8	1383	1292
H		Отпущенный мартенсит–бейнит	495	663	75,7	1446	1504
I	CrNi	Отпущенный	542	649	78,4	1351	1611
T		бейнит	396	628	66,1	1264	1229
s	CrV	Перлит–феррит	513	682	61,2	1286	1274
A	Fe	Феррит	194	309	79,3	775	889
E	FeMn		331	492	75,2	1056	1197
C			317	481	74,1	949	1133
N			252	422	70,1	891	953
O		Феррит–перлит	245	467	68,5	1082	993
p			275	463	76,6	1099	1193
S		Феррит	271	437	72,9	905	989
B	Lo8CrNiMo	Бейнит	839	1038	51,7	1813	1651
P	Lo17CrNiMo		915	1306	49,9	1920	2011

*Примечания:* латинские буквы и марки КС — обозначения в [3, 7, 8];  $\sigma_B$  — предел прочности,  $\psi_K$  — относительное сужение в момент разрушения образца (показатель пластичности),  $S_K$  — истинное напряжение разрушения при одноосном растяжении образцов без КН,  $R_X$  — хрупкая прочность [6–8, 11].

пературы  $T_0$  [3]), а также других пропорциональных образцов толщиной  $t$  от 12 мм до 150 мм для определения КИН при  $T_K$ .



### 3. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕФЕРЕНСНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ $T_0$

В основу предлагаемой методики прогнозирования референсной температуры  $T_0$ , как и в случае [3], положено сравнение характеристик, полученных под воздействием КН типа К2 ( $T_0$ ) и под воздействием КН типа К1 ( $T_C$ ). Однако, в отличие от поиска корреляционной зависимости между знаковыми температурами  $T_0$  и  $T_C$  [3], в предлагаемой нами методике была найдена устойчивая корреляционная связь (величина остаточной дисперсии  $D < 1,3 \cdot 10^{-3}$ ) между значениями прочностей  $\sigma_{0,2}(T_0)$  и  $\sigma_{0,2C}$  при соответствующих знако-

**ТАБЛИЦА 2.** Значения исходных базовых механических характеристик  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ,  $\psi_K$ ,  $R_X$ ,  $S_K$  КС по данным литературных источников [12–17] в условиях одноосного растяжения при 293 К (для определения референсной температуры  $T_0$ ).

**TABLE 2.** The values of the initial basic mechanical characteristics of  $\sigma_Y$ ,  $\sigma_B$ ,  $\psi_K$ ,  $R_X$  and  $S_K$  KS obtained from literature sources [12–17] under conditions of uniaxial tension at 293 K (to determine the reference temperature  $T_0$ ).

№ п/п	КС	Обработка	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\psi_K$ , %	$R_X$ , МПа [11]	$S_K$ , МПа
1	15XCHД [14]	Состояние	328	520	68,0	1085	1045
2	АК-35 [13]	поставки	1027	1141	75,0	2184	2321
3	СП 12ХН2МДФ	КФ 48-АНК-54,	623	759	55,6	1268	1156
4	[13]	$B = 0,001$	628	780	68,1	1476	1280
5	СП 12ХН2МДФ	КФ 48-АНК-54,	642	783	67,9	1466	1401
	[13]	$B = 0,001$					
6	15Х2МФАА [17]	НГ 1273 К, 10,5 ч, ОП 963–973 К, 19 ч + ОП 933–943, 50 ч	509	650	77,4	1393	1472
7	10ГН2МФА [12]	состояние поставки	480	610	69,7	1227	1260
8	15Х2МФА [15]	З 1273 К, 4 ч, ОП 893 К, 6 ч	1100	1157	67,2	1945	2296
9	15Х2МФА [15, 16]	З 1273 К, 13 ч, ОП 923 К, 24 ч + ОП 923–943, 84 ч	584	700	74,0	1405	1558
10	15Х2НМФА [15, 16]	З 1193 К, 15 ч, ОП 873 К, 20 ч + ОП 923, 9 ч, 893 К, 25 ч, 923 К, 20 ч	583	707	69,5	1335	1456
11	15Х2НМФА [15]	З 1173 К, 8 ч, ОП 823 К, 6 ч	725	816	68,7	1478	1658

**ТАБЛИЦА 3.** Значения исходных базовых механических характеристик  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ,  $\psi_K$ ,  $R_X$ ,  $S_K$  КС по данным [12–14], [18–20] и других литературных источников в условиях одноосного растяжения при 293 К (для определения коэффициента интенсивности напряжений (КИН)  $K_{Q(IC)}$  при  $T_K$ ).

**TABLE 3.** The values of the initial basic mechanical characteristics of  $\sigma_Y$ ,  $\sigma_B$ ,  $\psi_K$ ,  $R_X$  and  $S_K$  KS determined from data [12–14], [18–20] and other literature sources under conditions of uniaxial tension at 293 K (to determine the stress intensity factor (KIN)  $K_{Q(IC)}$  at  $T_K$ ).

№ п/п	КС	Обработка	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\psi_K$ , %	$R_X$ , МПа [11]	$S_K$ , МПа
1	АК-35 [13]	Состояние поставки	1027	1141	75,0	2184	2321
2	$\alpha$ -Fe [13]	З 1323 К, 2 ч, ПО	138	307	83,8	964	700
3	10ХСНД [13]	З 1373 К, 2 ч, ПО	312	454	72,0	964	920
4	Ст. 3 сп. [13]	З 1373 К, 2,75 ч, ПО	160	340	71,7	824	502
5	10Х15Н27Т3	З 1373 К, 1 ч + ОП,	870	1270	23,0	1748	1583
6	B2MP [19]	1023 К, 16 ч; 923 К, 10 ч то же + Н <sub>2</sub>	880	1280	10,0	1593	1443
7	15Х12Н2МФ АВ [18]	З 1393 К, 1 ч + ОП 953 К, 2 ч	940	1080	62,0	1861	1983
8	03Х12Н10МТ [18]	З 1273 К, 1 ч; 1023 К, 2 ч + ОП 773 К, 2 ч	940	1090	79,0	2254	2670
9		З 1373 К, 15 м; 1023 К, 2 ч + ОП 773 К, 2 ч	930	1010	76,0	1922	2325
10		ПП-АНЗО, 1 слой	430	636	67,5	1285	1359
11	СШ Х75 [13]	ПП-АНЗО, 2 слоя	361	662	60,7	1328	1144
12		ПП-АНЗО, 3 слоя	404	730	51,9	1333	1252
17	20Х [12]	ОП 473 К	1150	1210	53,9	1905	1932

вых температурах  $T_0$  и  $T_C$ , а ключевым фактором для достижения такой высокоточной связи является учёт ВП между температурами  $T_K - T_0 - T_C$ .

Опорными силовыми показателями КС, определяющими предельные значения их деформационной стойкости  $B_r(T_0)$  по (3) при температуре  $T_0$ , являются критическая прочность  $\sigma_{0,2}(T_0)$  в условиях действия на металл НСП и соответствующее этой прочности критическое значение истинного напряжения разрушения  $SK(T_0)$  образца в условиях линейного напряжённого состояния (ЛНС) при стационарном нагружении.

Информация о величинах референсной температуры  $T_0$  для КС разной исходной прочности  $\sigma_{0,2}$  [3], значениях критической прочности  $\sigma_{0,2C}$  и  $\sigma_{0,2}(T_0)$ , определённых на температурной зависимости прочности  $\sigma_{0,2}(T)$  по (2) с использованием известных из [3] значений

Продолжение ТАБЛИЦЫ 3.

Continuation of TABLE 3.

№ п/п	КС	Обработка	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\psi_K$ , %	$R_K$ , МПа [11]	$S_K$ , МПа
17	20X [12]	ОП 473 К	1150	1210	53,9	1905	1932
18	50X [12]	З 1113 К + ОП 423 К, 2 ч	1860	2300	16,5	2868	3050
19		З 1113 К + ОП 473 К, 2 ч	1920	2090	46,7	3158	3149
20		З 1113 К + ОП 673 К, 2 ч	1560	1640	48,6	2500	2558
21		З 1113 К + ОП 773 К, 2 ч	1200	1270	57,2	2044	1980
22	40C2X [12]	ВТМО + ОП 473 К	1760	2060	53,0	3323	2869
23		ВТМО + ОП 573 К	1690	1910	55,0	3091	2789
24	60C2X [12]	ВТМО + ОП 573 К	2205	2400	38,0	3429	3594
25		ВТМО + ОП 773 К	1570	1715	40,0	2482	2575
26	ШХ15 [12]	З 1133 К + ОП 473 К	2120	2340	3,6	2655	3814
27	24ХН0МФА [12]	З 1153 К + ОП 913 К, 15 ч	765	870	73,5	1664	1920
28	65Ф [12]	Состояние поставки	700	1080	28,0	1566	1183
29	10ХСНД [20]	Вдоль проката	419	592	69,7	1207	1223
30		Поперек проката	445	633	73,7	1362	1402
31	12Г2МФТ [20]	Вдоль проката	571	667	65,6	1196	1290
32		Поперек проката	602	696	58,4	1167	1222
33	15ХСНД [14]	Состояние поставки	328	520	68,0	1085	1046

Примечания: ПО — печное охлаждение, Н<sub>2</sub> — водородная среда, ПП — порошковая проволока, ВТМО — высокотемпературная термомеханическая обработка.

$T_0$ , а также учёт ВП между знаковыми температурами  $T_K - T_0 - T_C$  дают возможность построить зависимости  $\sigma_{0,2}(T_0)/\sigma_{0,2} = f(\sigma_{0,2C}/\sigma_{0,2})$  и  $S_K(T_0)/S_K = f(\sigma_{0,2}(T_0)/\sigma_{0,2})$ . Для полноты анализа использовали экспериментальные данные из разных литературных источников, полученные для КС, подвергнутых различным видам термообработки, пропорциональные образцы из которых различной толщины  $t$  с КН типа К2 испытывали на трёхточечный изгиб и внецентренное растяжение. Базовые механические характеристики таких КС представлены в табл. 2, а показатели свойств в концепции конструкционной пригодности — в табл. 4.

Зависимости  $\sigma_{0,2}(T_0)/\sigma_{0,2} = f(\sigma_{0,2C}/\sigma_{0,2})$  и  $S_K(T_0)/S_K = f(\sigma_{0,2}(T_0)/\sigma_{0,2})$  представлены на рис. 3.

Таким образом величину  $\sigma_{0,2}(T_0)$  можно прогнозировать, используя экспоненциальные зависимости  $\sigma_{0,2}(T_0)/\sigma_{0,2} = f(\sigma_{0,2C}/\sigma_{0,2})$  (величина остаточной дисперсии  $D < 7,1 \cdot 10^{-4}$ ) — рис. 3, а: для ВП 1-1-1, 2-2-2, 2-2-1, 2-1-1 (кривые 4, 2, 3, 5 соответственно):

$$\sigma_{0,2}(T_0) = \sigma_{0,2} [a \exp(\sigma_{0,2C} / (b \sigma_{0,2})) + c], \quad (5)$$

для ВП 1-2-1 (кривая 1):

$$\sigma_{0,2}(T_0) = \sigma_{0,2} \{a \exp[-\exp(-z) - z + 1] + d\}, \quad (6)$$

где величина прочности  $\sigma_{0,2C}$  при температуре  $T_C$  определяется экспериментальным способом по условию  $\sigma_{GY} = \sigma_{NF}$  [3, 22] по (2) или расчётным способом [7–9, 23] по (1) и (2) с использованием закономерностей структурно-механического охрупчивания и учётом ВП между температурами  $T_K - T_C$  (рис. 2); эмпирические коэффициенты в (1) — табл. 1; параметр  $z = (\sigma_{0,2C} / \sigma_{0,2} - b) / c$ ;  $a, b, c, d$  — эмпирические коэффициенты, зависящие от ВП между температурами  $T_K - T_0 - T_C$ , — табл. 2.

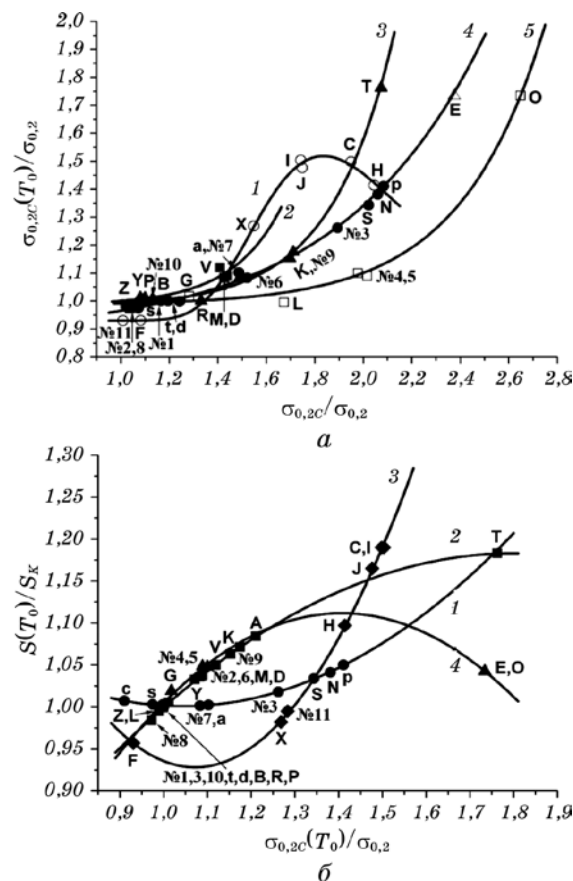
Зависимости  $S_K(T_0) / S_K = f(\sigma_{0,2}(T_0) / \sigma_{0,2})$  на рис. 3, б (величина остаточной дисперсии  $D < 2,0 \cdot 10^{-5}$ ) получены с целью более точного прогнозирования показателя  $S_K(T_0)$ , формирующего предельную величину деформационной стойкости  $B_r(T_0)$  по (3) для КС, которые используются в ядерной энергетике, в частности, для производства корпусов ядерных реакторов.

**ТАБЛИЦА 4.** Значения референсной температуры  $T_0$ , прочности  $\sigma_{0,2}(T_0)$  и основных характеристик в концепции конструкционной пригодности для пропорциональных образцов с КН типа К2 различной толщины  $t$  по данным [12–17] (табл. 2).

**TABLE 4.** The values of the reference temperature  $T_0$ , the strength  $\sigma_Y(T_0)$ , and the main characteristics in the concept of structural suitability for proportional samples with KN of K2 type of different thickness  $t$  according to the data [12–17] (Table 2).

№ П/П	$t$ , мм	ВП $T_K - T_0 - T_C$	$T_0$ , К	$B_r$	$\sigma_{0,2}(T_0)$ , МПа	$B_r(T_0)$	$P_{me}(T_0)$	$B_{rc0}$	$B_{rc0}(T_0)$	$P_{mec0}(T_0)$
1	26	1-1-1	293	3,19	328	3,19	1,0	3,02	3,02	1,0
2	18	2-2-2	195	2,26	1100	2,19	1,03	1,84	1,08	1,70
3	15	1-1-1	192	1,86	786	1,51	1,22	2,09	1,90	1,10
4	15	2-1-1	196	2,04	684	1,96	1,04	2,02	2,05	0,99
5	15	2-1-1	196	2,18	706	2,08	1,05	2,09	2,04	1,02
6	25	2-2-1	248	2,89	554	2,75	1,05	1,97	1,82	1,08
7	25	1-1-1	223	2,63	520	2,42	1,09	1,69	1,94	0,87
8	25	2-2-2	328	2,09	1070	2,08	1,0	1,25	0,99	1,26
9	25	2-2-1	208	2,67	686	2,51	1,06	1,51	1,47	1,03
10	25	2-2-1	293	2,50	583	2,50	1,0	1,28	1,39	0,92
11	25	1-2-1	350	2,29	674	2,17	1,06	1,53	1,33	1,15

Примечания: №№ — КС в табл. 2.



**Рис. 3.** Зависимости для КС: *a* — отношения прочности при референсной температуре  $T_0$  к исходной  $\sigma_{0,2}(T_0)/\sigma_{0,2}$  от отношения критической прочности при температуре  $T_C$  к исходной  $\sigma_{0,2C}/\sigma_{0,2}$  для ВП между температурами  $T_K-T_0-T_C$ : 1 — 1-2-1 ( $\circ$ ), 2 — 2-2-2 ( $\blacksquare$ ), 3 — 2-2-1 ( $\blacktriangle$ ), 4 — 1-1-1 ( $\bullet$ ), 5 — 2-1-1 ( $\square$ ), сплав «E» ( $\triangle$ ) — 2-1-2; *b* — отношения истинных напряжений разрушения  $S_K(T_0)/S_K$  при температурах  $T_0$  и  $T_K$  от соответствующих значений прочности  $\sigma_{0,2}(T_0)/\sigma_{0,2}$  для ВП между температурами  $T_K-T_0$ : 1 — 1-1 ( $\bullet$ ), 2 — 2-2 ( $\blacksquare$ ), 3 — 1-2 ( $\blacklozenge$ ), 4 — 2-1 ( $\blacktriangle$ ); латинские буквы — обозначения КС в [3, 7, 8] — табл. 1; номера — литературные данные — табл. 2, 4.

**Fig. 3.** Dependencies for KS: *a*—the ratio of the strength at reference temperature  $T_0$  to the initial  $\sigma_Y(T_0)/\sigma_Y$  from the ratio of the critical strength at the temperature  $T_C$  to the initial  $\sigma_{YC}/\sigma_Y$  for the VP between the temperatures  $T_K-T_0-T_C$ : 1—1-2-1 ( $\circ$ ), 2—2-2-2 ( $\blacksquare$ ), 3—2-2-1 ( $\blacktriangle$ ), 4—1-1-1 ( $\bullet$ ), 5—2-1-1 ( $\square$ ), the alloy 'E' ( $\triangle$ )—2-1-2; *b*—the ratio of the true failure stresses  $S_K(T_0)/S_K$  at temperatures  $T_0$  and  $T_K$  from the corresponding strength values  $\sigma_Y(T_0)/\sigma_Y$  for the VP between the temperatures  $T_K-T_0$ : 1—1-1 ( $\bullet$ ), 2—2-2 ( $\blacksquare$ ), 3—1-2 ( $\blacklozenge$ ), 4—2-1 ( $\blacktriangle$ ); Latin letters—the designations of KS in [3, 7, 8]—Table 1; numbers—literary data—Tables 2, 4.

Приведенные на рис. 3, б зависимости имеют параболический характер и дают возможность определить значение параметров  $S_K(T_0)$  и  $B_r(T_0)$  по (3) и (5), (6), зная величины характеристик  $\sigma_{0,2}(T_0)$  и  $S_K$  из температурных зависимостей  $\sigma_{0,2}(T)$  и  $S_K(T)$ , полученных по результатам испытаний стандартных гладких цилиндрических образцов на одноосное квазистатическое растяжение:

$$S_K(T_0) = S_K \{a + b[\sigma_{0,2}(T_0)/\sigma_{0,2}] + c[\sigma_{0,2}(T_0)/\sigma_{0,2}]^2\}, \quad (7)$$

где  $a, b, c$  — эмпирические коэффициенты, зависящие от ВП между температурами  $T_K - T_0$ , — табл. 2.

Таким образом, прогнозирование референсной температуры  $T_0$  для КС, используемых в ядерной энергетике, сводится к её определению на температурной зависимости  $\sigma_{0,2}(T)$  по известному из (5), (6) значению  $\sigma_{0,2}(T_0)$ .

#### 4. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КИН $K_{Q(IC)}$ ПРИ $T_K$

На рисунке 4, а приведены зависимости  $B_{rc0} = f(B_r)$ , которые имеют логарифмический и экспоненциальный характер (величина остаточной дисперсии  $D \leq 4,27 \cdot 10^{-3}$ ) для 1-го и 2-го видов поведения механических характеристик при комнатной температуре  $T_K$  соответственно. Указанные зависимости получены в результате обработки достаточно большого массива экспериментальных данных КС, базовые механические характеристики которых представлены в табл. 3.

Такие зависимости дают возможность определить величины параметров  $B_{rc0}$  по (3) и  $\sigma_{c0}$ , зная величины исходных характеристик  $S_K$  и  $\sigma_{0,2}$ , полученные по результатам испытаний стандартных гладких цилиндрических образцов на одноосное квазистатическое растяжение, для разных видов КС при  $T_K$ :

для 1-го начального вида (кривая 1 на рис. 4, а)

$$B_{rc0} = b \ln[(S_K/\sigma_{0,2} - c)/a], \quad (8)$$

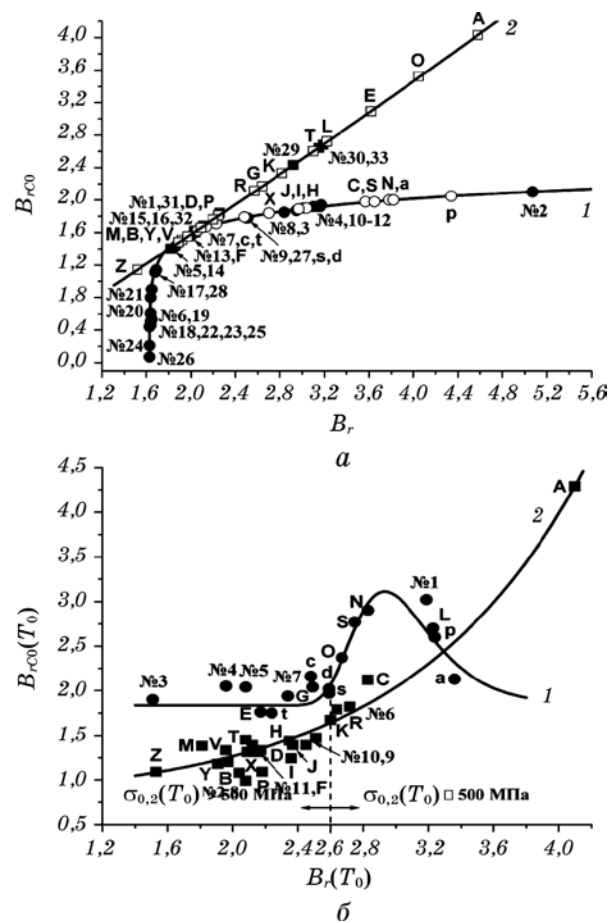
откуда из (3)

$$\sigma_{c0} = \sigma_{0,2} \{b \ln[(S_K/\sigma_{0,2} - c)/a]\}; \quad (9)$$

для 2-го начального вида (кривая 2 на рис. 4, а)

$$B_{rc0} = \exp[(S_K/\sigma_{0,2} + a)/b] - c, \quad (10)$$

откуда из (3):



**Рис. 4.** Зависимости для КС под действием КН типа К2: *a* — показателя изломостойкости  $B_{rc0}$  в условиях действия НСП от показателя изломостойкости  $B_r$  в условиях ЛНС при температуре  $T_K$ ; *б* — показателя изломостойкости  $B_{rc0}(T_0)$  в условиях действия НСП от показателя изломостойкости  $B_r(T_0)$  в условиях ЛНС при референсной температуре  $T_0$ ; 1 — начальный вид 1 (●, ○), 2 — начальный вид 2 (■, □); латинские буквы — обозначения КС в табл. 1; номера — обозначения КС в табл. 3; темные знаки — экспериментальные значения, светлые знаки — расчётные значения.

**Fig. 4.** Dependences for KS under the action of KN type K2: *a*—index of the break resistance of  $B_{rc0}$  under the conditions of the action of the NSP from the index of the break resistance  $B_r$  under LNS conditions at the temperature  $T_K$ ; *б*—the index of the break resistance  $B_{rc0}(T_0)$  under the action of the NSP from the index of the break resistance  $B_r(T_0)$  under the conditions of the LNS at the reference temperature  $T_0$ ; 1—initial type 1 (●, ○), 2—initial type 2 (■, □); Latin letters—designations KS in Table 1; numbers—designations KS in Table 3; dark signs—experimental values, light signs—calculated values.

$$\sigma_{c0} = \sigma_{0,2} \{ \exp[(S_K / \sigma_{0,2} + a)/b] - c \}, \quad (11)$$

где  $a, b, c$  — эмпирические коэффициенты, зависящие от начального вида поведения механических характеристик при комнатной температуре  $T_K$ , — табл. 2.

Таким образом, зная величину номинального разрушающего напряжения по ослабленному сечению образца  $\sigma_{c0}$ , согласно [2] можно рассчитать величину КИН  $K_{Q(IC)}$  при комнатной температуре  $T_K$  под действием КН типа К2 в условиях трёхточечного изгиба [3]:

$$K_{Q(IC)} = \frac{\sigma_{c0}(b-l)^2 LY_4}{6b\sqrt{b^3}}, \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}, \quad (12)$$

а для пропорциональных образцов

$$K_{Q(IC)} = 0,627 \sigma_{c0} / t^{-0,5}, \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}, \quad (13)$$

где показатель  $\sigma_{c0}$  следует определять для 1-го начального вида согласно (9), а для 2-го начального вида — согласно (11);  $t$  — толщина образца,  $b$  — высота образца,  $l$  — общая длина КН,  $L$  — расстояние между опорами,  $Y_4 = 3,494[1 - 3,396(l/b) + 5,839(l/b)^2]$  — поправочная функция [2] (функция  $K$ -тарировки).

## 5. ОЦЕНКА КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРИГОДНОСТИ КС

На рисунке 4, б приведены зависимости  $B_{rc0}(T_0) = f(B_r(T_0))$  (величина остаточной дисперсии  $D \leq 1,37 \cdot 10^{-2}$ ), которые имеют экспоненциальный характер для 1-го и 2-го видов поведения механических характеристик при референсной температуре  $T_0$ . Такие зависимости дают возможность определить величины параметра  $B_{rc0}(T_0)$ , зная величины исходных характеристик  $\sigma_{0,2}(T_0)$  по (5), (6) и  $S_K(T_0)$  по (7), полученные по результатам испытаний стандартных гладких цилиндрических образцов на одноосное квазистатическое растяжение:

для вида 1 при  $T_0$  (кривая 1 на рис. 4, б)

$$B_{rc0}(T_0) = a \exp[-\exp(-z) - z + 1] + d, \quad (14)$$

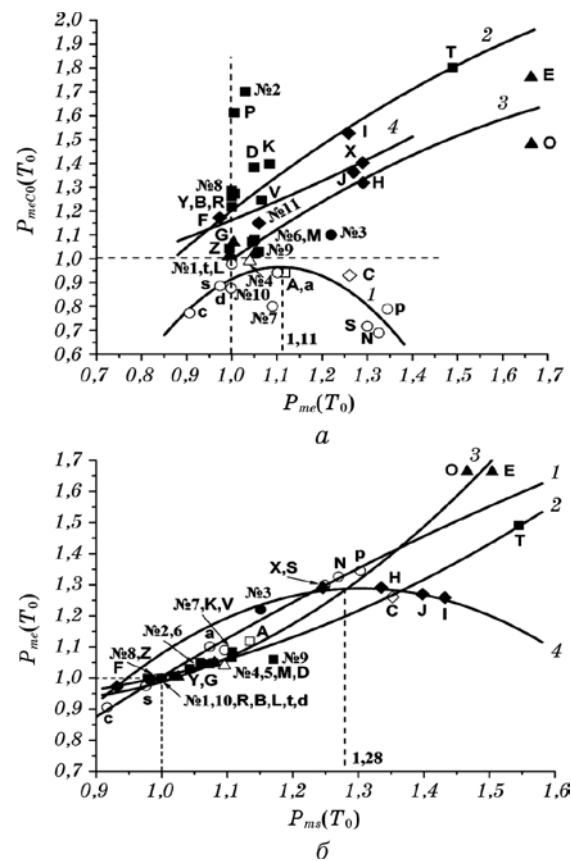
где параметр  $z = [B_r(T_0) - b]/c$ ;

для вида 2 при  $T_0$  (кривая 2 на рис. 4, б)

$$B_{rc0}(T_0) = a \exp[B_r(T_0)/b] + c, \quad (15)$$

где  $a, b, c, d$  — эмпирические коэффициенты, зависящие от вида КС при  $T_0$ , — табл. 2.





**Рис. 5.** Зависимости для КС по результатам действия КН типа К2: *a* — резерва конструкционной пригодности  $P_{mec0}(T_0)$  в условиях действия НСП от резерва конструкционной пригодности  $P_{me}(T_0)$  в условиях ЛНС по (4); *б* — резерва конструкционной пригодности  $P_{me}(T_0)$  от показателя остаточной механической стабильности  $P_{ms}$  в условиях ЛНС при  $T_0$  [5, 7]; ВП между температурами  $T_K - T_0$ : 1 — 1-1 (●, ○), 2 — 2-2 (■, □), 3 — 2-1 (▲, △), 4 — 1-2 (◆, ◇); тёмные знаки — сплавы с пониженной изломостойкостью  $B_{rc0}(T_0)$  при  $T_0$  (1-я группа), светлые знаки — сплавы с повышенной изломостойкостью  $B_{rc0}(T_0)$  при  $T_0$  (2-я группа); латинские буквы — обозначения КС в табл. 1; номера — литературные данные в табл. 2, 4.

**Fig. 5.** Dependences for KS under the action of KN type K2: *a*—reserve of constructional suitability  $P_{mec0}(T_0)$  under the conditions of the IFF effect from the reserve of constructional suitability  $P_{me}(T_0)$  under the conditions of LNS by (4); *б*—the reserve of constructional suitability  $P_{me}(T_0)$  of the residual mechanical stability  $P_{ms}$  at  $T_0$  under LNS conditions [5, 7]; VP between the temperatures  $T_K - T_0$ : 1—1-1 (●, ○), 2—2-2 (■, □), 3—2-1 (▲, △), 4—1-2 (◆, ◇); dark signs—alloys with reduced break resistance  $B_{rc0}(T_0)$  at  $T_0$  (1-st group), light signs—alloys with increased break resistance  $B_{rc0}(T_0)$  at  $T_0$  (2-nd group); Latin letters—designations KS in Table 1; numbers—the literary data in Tables 2, 4.

Разработанная выше методика для расчёта таких механических характеристик КС, как  $B_{rc0}(T_0)$  и  $B_{rc0}$ , позволяет оценить резервы конструкционной пригодности  $P_{me}(T_0)$ , зная результаты испытаний гладких образцов в условиях ЛНС, и  $P_{meC0}(T_0)$  от действия на металл КН типа К2 в условиях действия НСП по (4). Для дальнейшего анализа интерес представляют зависимости  $P_{meC0}(T_0) = f(P_{me}(T_0))$  и  $P_{me}(T_0) = f(P_{ms}(T_0))$  — рис. 5.

Из рисунка 5, а видно, что КС, находящиеся в условиях НСП под действием КН типа К2 при трёхточечном изгибе, можно разделить на две группы:

первая группа (тёмные знаки на рис. 5) характеризуется более низким уровнем изломостойкости  $B_{rc0}(T_0)$  при  $T_0$ , чем при  $T_K$ , и включает в себя сплавы, в основном, с ВП 2-2, 2-1, 1-2<sup>2</sup> между этими температурами

$$P_{meC0}(T_0) = B_{rc0}/B_{rc0}(T_0) = [\sigma_{c0}/\sigma_{c0}(T_0)] \cdot \sigma_{0,2}(T_0)/\sigma_{0,2} \geq 1; \quad (16)$$

вторая группа (светлые знаки на рис. 5), наоборот, характеризуется более высоким уровнем изломостойкости  $B_{rc0}(T_0)$  при  $T_0$ , чем при  $T_K$  и, в основном, включает в себя сплавы с ВП 1-1 между  $T_K$ – $T_0$ , а также некоторые КС с другими ВП

$$P_{meC0}(T_0) < 1. \quad (17)$$

Следует отметить, что в 1-ю группу входят сплавы разных классов прочности, большинство из которых удовлетворяют критерию конструкционной пригодности

$$P_{me}(T_0) \geq 1 \quad (18)$$

и обладают пониженными резервами НС при  $T_0$ .

Ко 2-й группе, как правило, принадлежат КС низкой ( $\sigma_{0,2} < 500$  МПа) и средней прочности с повышенными значениями НС при  $T_0$ , многие из которых не удовлетворяют критерию конструкционной пригодности по (18).

## 6. ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ СПЛАВА НА ФОРМИРОВАНИЕ ВП. СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВП

Важно ещё раз отметить необходимость информации о виде поведения механических характеристик металла для установления связей между сложными (комплексными) параметрами сплавов с простыми (базовыми) характеристиками, а также их связей между со-

<sup>2</sup> ВП 1-1 для первой группы КС встречается редко, в нашем случае — это сплав № 3, табл. 4.

бой. Именно проявление видовой принадлежности позволило установить связь между показателями прочности (силовой надёжности) в условиях действия на металл однородных (без КН) и неоднородных (без действия КН) силовых полей. Для КС такая связь была установлена как при исходной (комнатной) температуре  $T_K$  (рис. 4, а), так и при разных знаковых критических температурах  $T_b$  (температура начала охрупчивания под действием КН [21]),  $T_0$  (рис. 4, б). Несомненно, эта связь должна существовать и для других температур в исследуемом нами интервале ( $T_C \leq T \leq T_K$ ).<sup>3</sup> Таким образом, фактор проявления видов и, соответственно, ВП становится фундаментальным в материаловедении и требует более глубокого исследования.

Для этого необходимо проанализировать влияние температурной зависимости прочности  $\sigma_{0,2}(T)$  на формирование ВП. Как было указано выше, температурная зависимость  $\sigma_{0,2}(T)$  по (2) отображает воздействие на металл условий нагружения и зависит от скорости деформации, её величины и структурного состояния сплава [6, 10]. Следовательно, форма зависимости  $\sigma_{0,2}(T)$ , т.е. начальный уровень и кривизна экспоненциальной кривой по (2), несут информацию не только о видовой принадлежности данного металла в каждой своей точке, но и о влиянии его структурного состояния на формирование ВП в условиях низкотемпературного охрупчивания. При этом начальный уровень температурной зависимости  $\sigma_{0,2}(T)$  определяется значением исходной прочности  $\sigma_{0,2}$  сплава (при  $T_K$ ), а её кривизна — коэффициентами  $C_1$  и  $C_2$  в выражении (2), отражающими его структурное состояние. Так формируются ВП в исследуемом нами температурном интервале ( $T_K - T_C$ ) между знаковыми температурами  $T_K - T_0 - T_b - T_C$  (или др. промежуточными температурами в этом интервале) для каждого конкретного сплава, информация о которых необходима для аналитической оценки взаимосвязей механических свойств в различных условиях воздействия на металл как однородных, так и неоднородных силовых полей.

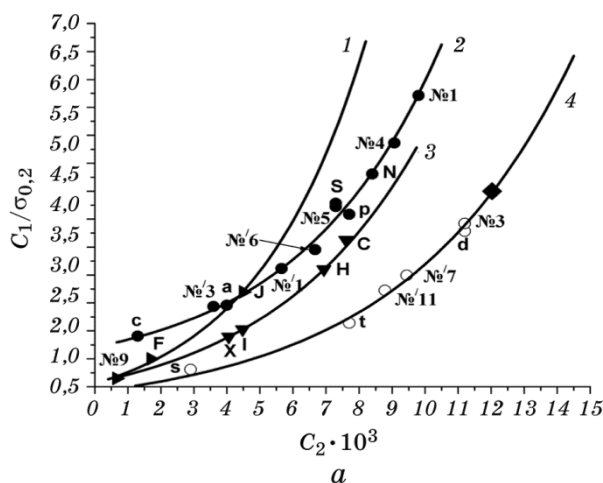
На рисунке 6 представлены закономерности отношений величины коэффициента  $C_1$  к прочности  $\sigma_{0,2}$  от величины коэффициента  $C_2$  в температурной зависимости прочности  $\sigma_{0,2}(T)$  по (2) для разных ВП при знаковых температурах  $T_K - T_0 - T_b - T_C$ .

Из рисунка 6 видно, что влияние структурного состояния КС зависит от начального (при  $T_K$ ) вида поведения механических характеристик сплава: для 1-го начального вида (рис. 6, а) формирование ВП между знаковыми температурами  $T_K - T_0 - T_b - T_C$  происходит при возрастающем значении отношения напряжения Пайерлса–Набарро (коэффициент  $C_1$ ) к прочности  $\sigma_{0,2}$  с увеличением плотности дислокаций и длины дислокационных сегментов (коэффициент  $C_2$ ) со

<sup>3</sup> Некоторые КС были исследованы в разделе 3 при повышенных референсных температурах вплоть до  $T_0 = 364$  К [3].

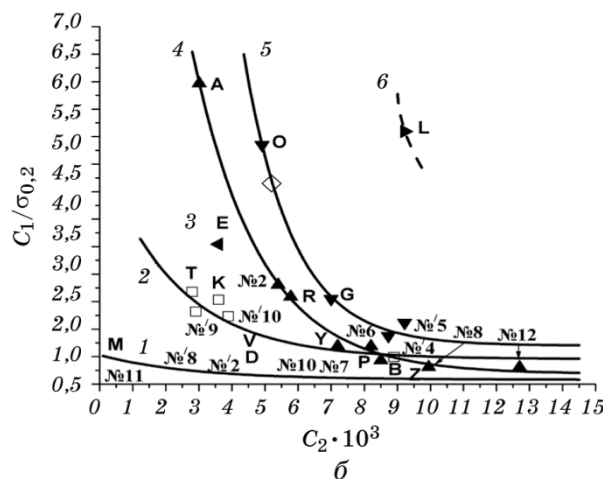
снижением интенсивности  $d(C_1/\sigma_{0,2})/dC_2$  по мере падения температуры в интервале  $T_K-T_C$  от ВП 1-1-2-2 до ВП 1-1-2-1, а для 2-го начального вида (рис. 6, б), наоборот, — характерным для формирования ВП является снижение отношения  $C_1/\sigma_{0,2}$  при увеличении показателя  $C_2$  для всех ВП с всё возрастающей интенсивностью  $d(C_1/\sigma_{0,2})/dC_2$  низкотемпературного охрупчивания от ВП 2-2-2-2 до ВП 2-1-1-1. При этом в обоих случаях наблюдается экспоненциальный характер зависимостей  $C_1/\sigma_{0,2} = f(C_2)$ , что соответствует такому же характеру изменения зависимости  $\sigma_{0,2}(T)$  по (2).

Следует отметить, что указанные принципы формирования ВП характерны для КС низкой и средней исходной прочности  $\sigma_{0,2}$  (для



**Рис. 6.** Карта видовых переходов в условиях низкотемпературного охрупчивания КС. Закономерности отношений величины коэффициента  $C_1$  в температурной зависимости прочности  $\sigma_{0,2}(T)$  по (2) к прочности  $\sigma_{0,2}$  от величины коэффициента  $C_2$  в той же зависимости для разных ВП при знаковых температурах  $T_K-T_0-T_b-T_C$ : а — для 1-го начального вида 1 — 1-2-1-1 (▴), 2 — 1-1-1-1 (●), 3 — 1-2-2-1 (▼), 4 — 1-1-2-1 (○); б — для 2-го начального вида: 1 — 2-2-2-2 (■), 2 — 2-2-1-1 (□), 3 — 2-1-2-2 (◀), 4 — 2-2-2-1 (▲), 5 — 2-1-1-1 (▼), 6 — 2-1-2-1 (▴); латинские буквы — обозначение КС в табл. 1, №№ — данные [22], №'№' — данные табл. 2.

**Fig. 6.** Map of types transitions in conditions of low-temperature embrittlement of copolymers. Regularities of the ratio of the coefficient  $C_1$  in the temperature dependence of the strength  $\sigma_Y(T)$  in accordance with (2) to the strength  $\sigma_Y$  on the value of the coefficient  $C_2$  in the same dependence for different VP at sign temperatures  $T_K-T_0-T_b-T_C$ : а — for 1-st of the initial form 1 — 1-2-1-1 (▴), 2 — 1-1-1-1 (●), 3 — 1-2-2-1 (▼), 4 — 1-1-2-1 (○); б — for the 2-nd initial view: 1 — 2-2-2-2 (■), 2 — 2-2-1-1 (□), 3 — 2-1-2-2 (◀), 4 — 2-2-2-1 (▲), 5 — 2-1-1-1 (▼), 6 — 2-1-2-1 (▴); Latin letters — the designation of KS in Table 1, Nos. — the data [22], Nos.' — the data of Table 2.



Продолжение Рис. 6.

Continuation of Fig. 6.

1-го начального вида), средней и высокой прочности (для 2-го начального вида). Такой принципиально различный характер влияния структурного состояния КС на формирование ВП с разным начальным видом можно описать соответствующими экспоненциальными зависимостями:

для 1-го начального вида поведения механических характеристик КС:

$$C_1/\sigma_{0.2} = a \exp(C_2 \cdot 10^3/b) + c; \quad (19)$$

для 2-го начального вида поведения механических характеристик КС:

$$C_1/\sigma_{0.2} = a \exp(-C_2 \cdot 10^3/b) + c, \quad (20)$$

где  $a, b, c$  — эмпирические коэффициенты, зависящие от ВП между знаковыми температурами  $T_K - T_0 - T_b - T_c$ , — табл. 2<sup>4</sup>.

Таким образом, способ определения ВП для КС заключается в последовательном выполнении следующих действий:

1) определить начальный вид поведения механических характеристик сплава при комнатной температуре испытаний  $T_K$  согласно известной методике [7, 9, 24];

<sup>4</sup> В указанной таблице приведены среднестатистические значения эмпирических коэффициентов по данным исследованной выборки КС, которые могут уточняться и дополняться по мере пополнения этой выборки.

2) определить ВП сплава по карте видовых переходов (рис. 6): для 1-го начального вида (рис. 6, а) или для 2-го начального вида (рис. 6, б).

## 7. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С целью определения наилучших и непригодных с точки зрения эксплуатационной надёжности сплавов с разной исходной прочностью  $\sigma_{0,2}$ , находящихся в условиях действия НСП, создаваемых КН типа К2, следует проанализировать зависимости  $P_{meC0}(T_0) = f(P_{me}(T_0))$ , представленные на (рис. 5, а). Зависимости  $P_{meC0}(T_0) = f(P_{me}(T_0))$  зависят от ВП между знаковыми температурами  $T_K - T_0$  и описываются разными параболическими функциями: для ВП 1-1, 2-2 и 2-1 — выпуклыми (соответственно кривые 1, 2, 3 на рис. 5, а), а для ВП 1-2 — вогнутыми (кривая 4 на рис. 5, а). При этом наблюдается рост показателя  $P_{meC0}(T_0)$  при повышении  $P_{me}(T_0)$  в условиях действия НСП для ВП 2-2, 2-1, 1-2 во всём исследованном интервале изменения конструкционной пригодности, а для ВП 1-1 такой рост имеет место только до величины  $P_{me}(T_0) = 1,11$ , после чего у некоторых КС 2-й группы происходит увеличение НС (падение  $P_{meC0}(T_0)$ ) при повышении  $P_{me}(T_0) > 1,11$ . Такими положительными свойствами обладают сплавы «S», «N», «p», а также сплав «C» с ВП 1-2 (рис. 5, а), табл. 1.

Зависимости  $P_{meC0}(T_0) = f(P_{me}(T_0))$  достаточно хорошо описываются вышеуказанными функциями с величиной остаточной дисперсии  $D < 0,039$ , используя которые можно найти связь между показателями конструкционной пригодности в условиях действия однородных и неоднородных силовых полей:

$$P_{meC0}(T_0) = a + bP_{me}(T_0) + c[P_{me}(T_0)]^2, \quad (21)$$

где  $a, b, c$  — эмпирические коэффициенты, зависящие от ВП между температурами  $T_K - T_0$ , — табл. 2.

Используя рисунок 5, а, легко выявить как сплавы, не удовлетворяющие критерию конструкционной пригодности  $P_{me}(T_0) \geq 1$  по (18), — это КС «s», «c», «d» (ВП 1-1); «F» (ВП 1-2), «Z» (ВП 2-2), «L» (ВП 2-1), так и КС, обладающие наивысшими показателями конструкционной пригодности: «p» (ВП 1-1,  $P_{me}(T_0) = 1,35$ ); «X», «H» (ВП 1-2,  $P_{me}(T_0) = 1,29$ ); «T» (ВП 2-2,  $P_{me}(T_0) = 1,49$ ); «O», «E» (ВП 2-1,  $P_{me}(T_0) = 1,66$ ).

Весьма показательным является сравнительный анализ КС по критериям конструкционной пригодности по (18) и остаточной механической стабильности, т.е. по признаку опасности хрупкого разрушения при референсной температуре  $T_0$  [5]:

$$P_{ms}(T_0) > 1. \quad (22)$$

Этот анализ легко можно провести, используя зависимости  $P_{me}(T_0) = f(P_{ms}(T_0))$ , представленные на рис. 5, б. Из этого рисунка видно, что анализ конструкционной непригодности КС только по признаку опасности хрупкого разрушения по (22) выделяет в эту категорию еще большее количество сплавов, так как критерий (22) является более «жестким», чем критерий (18). Таким образом, к сплавам, выявленным в качестве непригодных по критерию (18), следует добавить ещё следующие, выявленные по критерию (22): «t», № 1 (ВП 1-1), № 11 (ВП 1-2), «R», «B», № 8, № 10 (ВП 2-2), табл. 1, 2.

Зависимости  $P_{me}(T_0) = f(P_{ms}(T_0))$ , как и в предыдущем случае (рис. 5, а), зависят от ВП между знаковыми температурами  $T_K - T_0$  и достаточно хорошо описываются параболическими функциями с величиной остаточной дисперсии  $D < 0,0014$ , что позволяет найти связь между характеристиками  $P_{me}(T_0)$  и  $P_{ms}(T_0)$  в условиях действия НСП, создаваемых КН типа К2 (рис. 5, б):

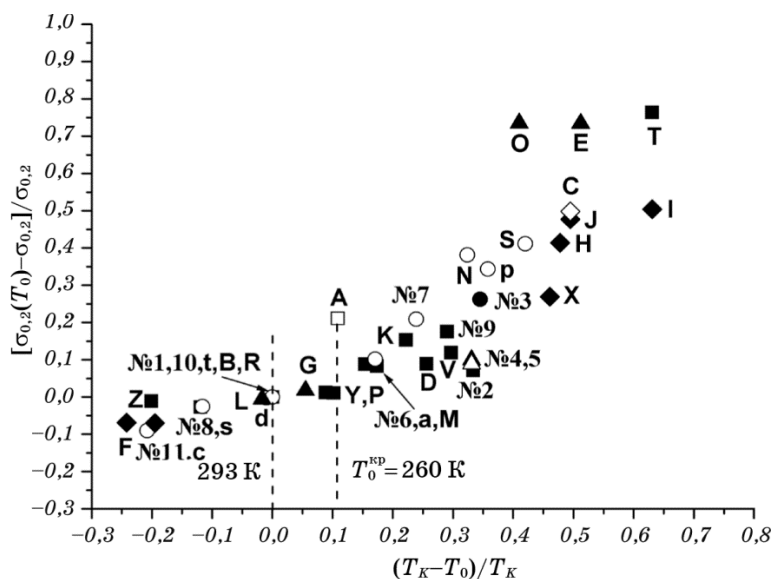
$$P_{me}(T_0) = a + bP_{ms}(T_0) + c[P_{ms}(T_0)]^2, \quad (23)$$

где  $a, b, c$  — эмпирические коэффициенты, зависящие от ВП между температурами  $T_K - T_0$ , — табл. 2.

При этом наблюдается рост показателя  $P_{me}(T_0)$  при повышении  $P_{ms}(T_0)$  в условиях действия НСП для ВП 1-1, 2-2, 2-1 во всём исследованном интервале изменения конструкционной пригодности, а для ВП 1-2 такой рост имеет место только до величины  $P_{ms}(T_0) = 1,28$ , после чего у некоторых КС показатель конструкционной пригодности  $P_{ms}(T_0)$  немного снижается при повышении  $P_{ms}(T_0) > 1,28$  (сплавы «Н», «J», «I» 1-й группы и сплав «С» 2-й группы) — рис. 5, б, табл. 1.

Приведённый выше анализ о важности проведения оценки конструкционной пригодности КС, которые используются в ядерной энергетике, с использованием обоих критериев — по (18) и по (22), а также дополнительного — по степени низкотемпературного охрупчивания. Такой дополнительный анализ конструкционной пригодности КС в условиях действия КН типа К2 следует проводить, используя общую карту расположения исследуемых сплавов в системе координат  $[\sigma_{0,2}(T_0) - \sigma_{0,2}] / \sigma_{0,2} - (T_K - T_0) / T_K$  (рис. 7).

Из рисунка 7 видно, что для КС, не удовлетворяющих критериям конструкционной пригодности (18) и (22), имеет место условие  $T_0 \geq T_K$ , поэтому эти сплавы не могут применяться в изделиях и ЭК, используемых в ядерной энергетике. Ещё одну «группу риска» можно выделить, обозначив в качестве условного критического предела референсной температуры значение  $T_0$  для технически чистого железа («А» в табл. 1), которое не используется для изготовления изделий и ЭК в ядерной энергетике и исследовалось в [3] только



**Рис. 7.** Карта расположения КС в системе координат  $[\sigma_{0,2}(T_0) - \sigma_{0,2}]/\sigma_{0,2} - (T_K - T_0)/T_K$  под действием КН типа К2: темные знаки — сплавы с пониженной изломостойкостью  $B_{rc0}(T_0)$  при  $T_0$  (1-я группа), светлые знаки — сплавы с повышенной изломостойкостью  $B_{rc0}(T_0)$  при  $T_0$  (2-я группа); латинские буквы — обозначение КС в табл. 1; номера — литературные данные табл. 2, 4;  $T_0^{кр}$  — условный критический предел референсной температуры.

**Fig. 7.** Map of the location of the SS in the coordinate system  $[\sigma_Y(T_0) - \sigma_Y]/\sigma_Y - (T_K - T_0)/T_K$  under the action of KN type K2: dark signs—alloys with reduced break resistance  $B_{rc0}(T_0)$  at  $T_0$  (1-st group), light signs—alloys with increased fracture toughness  $B_{rc0}(T_0)$  at  $T_0$  (2-nd group); Latin letters—the designation of KS in Table 1; numbers—the literary data of Tables 2, 4;  $T_0^{кр}$ —is the conditional critical limit of the reference temperature.

в качестве объекта для сравнительной оценки механических свойств.

Таким образом, значение  $T_0^{кр} = 260$  К условно можно считать критическим для НСП, создаваемого КН типа К2 (рис. 7). Вследствие этого ещё несколько сплавов, у которых  $T_0 \geq T_0^{кр}$ , попадают в «группу риска» и их можно считать непригодными для использования в изделиях и ЭК ядерной энергетики — это КС «А»,  $T_0 = 260$  К; «Г»,  $T_0 = 277$  К; «У»,  $T_0 = 267$  К и «Р»,  $T_0 = 263$  К. Таким образом, для гарантированного обеспечения конструкционной пригодности КС в ядерной энергетике, необходимо контролировать три показателя —  $P_{me}(T_0)$  по критерию (18),  $P_{ms}(T_0)$  по критерию (22), а также уровень референсной температуры по условию  $T_0 < T_0^{кр} = 260$  К.

При этом в категорию наилучших по степени удалённости  $T_0$  от



$T_0^{\text{кр}}$  (т.е. с самыми низкими температурами  $T_0$ ) можно отнести следующие сплавы «Н» —  $T_0 = 153$  К, «Х» —  $T_0 = 158$  К, «Т» —  $T_0 = 108$  К, «Е» —  $T_0 = 143$  К, «О» —  $T_0 = 173$  К, которые выше уже были определены в качестве наилучших по показателю конструкционной пригодности  $P_{me}(T_0)$ , а также «I» —  $T_0 = 108$  К, «С» —  $T_0 = 148$  К, «J» —  $T_0 = 148$  К, «S» —  $T_0 = 188$  К с достаточно высокими показателями  $P_{me}(T_0) = 1,26; 1,26; 1,27; 1,30$  соответственно. Использование этих КС обеспечит наивысшую силовую надёжность изделий и ЭК, находящихся в условиях НСП под действием КН типа К2.

В таблице 5 представлены экспериментальные  $\sigma_{0,2}^{\text{эксп}}(T_0)$  по (2) и расчётные  $\sigma_{0,2}^{\text{расч}}(T_0)$  по (5), (6) значения прочности, и референсной температуры  $T_0^{\text{эксп}}$  [3],  $T_0^{\text{расч}}$  с использованием (2), а также показатели для оценки точности разработанной расчётной методики для КС, исследованных в [3, 8, 9] и обладающих достаточной степенью конструкционной пригодности.

Высокая точность определения показателей  $\sigma_{0,2}(T_0)$  и  $T_0$  (табл. 5),

**ТАБЛИЦА 5.** Экспериментальные и расчётные значения прочности  $\sigma_{0,2}^{\text{эксп}}(T_0)$ ,  $\sigma_{0,2}^{\text{расч}}(T_0)$  и референсной температуры  $T_0^{\text{эксп}}$ ,  $T_0^{\text{расч}}$  для ряда КС, исследованных в [3, 8, 9]; показатели для оценки точности разработанной расчётной методики.

**TABLE 5.** The experimental and calculated values of the strength  $\sigma_y^{\text{эксп}}(T_0)$ ,  $\sigma_y^{\text{расч}}(T_0)$  and the reference temperature  $T_0^{\text{эксп}}$ ,  $T_0^{\text{расч}}$  for a number of SS studied in [3, 8, 9]; indicators to assess the accuracy of the developed calculation methodology.

[3]	$\sigma_{0,2}^{\text{эксп}}(T_0)$ , МПа	$\sigma_{0,2}^{\text{расч}}(T_0)$ , МПа	$\delta$ , %	$T_0^{\text{эксп}}$ , К	$T_0^{\text{расч}}$ , К	$\Delta$ , К
J	725	734	1,2	148	147	-1
X	770	769	-0,2	158	156	-2
M	732	746	1,9	242	241	-1
V	759	742	-2,3	206	205	-1
K	604	611	1,1	228	225	-3
D	771	786	1,9	218	217	-1
H	700	704	0,6	153	151	-2
I	815	808	-0,8	108	110	2
T	698	700	0,3	108	111	3
E	574	578	0,7	143	144	1
C	475	471	-0,9	148	150	2
N	348	350	0,6	198	199	1
O	425	426	0,2	173	172	-1
P	388	388	0,0	170	170	0
S	368	368	1,2	188	189	1
a	462	462	-2,5	243	246	3

*Примечания:* буквы латинской — обозначения в [3, 8, 9], табл. 1, 6;  $\delta = [\sigma_{0,2}^{\text{расч}}(T_0) - \sigma_{0,2}^{\text{эксп}}(T_0)] \cdot 100 / \sigma_{0,2}^{\text{эксп}}(T_0)$  — относительная погрешность, %;  $\Delta = T_0^{\text{расч}} - T_0^{\text{эксп}}$  — температурный сдвиг, К.

а также возможность выявления наилучших сплавов в концепции конструкционной пригодности, открывает широкие перспективы для эффективного использования разработанной методологии на практике в области ядерной энергетики, в частности, для оценки эксплуатационной надежности металла корпусов ядерных реакторов.

## 8. ВЫВОДЫ

1. Установленные закономерности  $\sigma_{0,2}(T_0)/\sigma_{0,2} = f(\sigma_{0,2C}/\sigma_{0,2})$  зависят от видовых переходов между знаковыми температурами  $T_K - T_0 - T_C$  и дают возможность рассчитать величину прочности  $\sigma_{0,2}$  при референсной температуре  $T_0$ . Таким образом, упрощённое прогнозирование референсной температуры  $T_0$  для конструкционных сталей, используемых в ядерной энергетике, сводится к её определению на температурной зависимости  $\sigma_{0,2}(T)$  по известному значению  $\sigma_{0,2}(T_0)$ .
2. Установленные закономерности показателя изломостойкости  $B_{rc0}$  в условиях действия неоднородных силовых полей от показателя изломостойкости  $B_r$  в условиях линейного напряжённого состояния при комнатной температуре  $T_K$  (293 К) зависят от начального вида поведения механических свойств дают возможность прогнозировать величину коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Q(IC)}$  при этой температуре.
3. Разработанная методика для расчёта таких механических характеристик конструкционных сталей, как  $B_{rc0}(T_0)$  и  $B_{rc0}$ , позволяет оценить резервы конструкционной пригодности  $P_{me}(T_0)$ , зная результаты испытаний гладких образцов в условиях линейного напряжённого состояния, и  $P_{meC0}(T_0)$  от действия на металл концентраторов напряжений (усталостная трещина) в условиях действия неоднородных силовых полей.
4. Форма зависимости температурной зависимости прочности  $\sigma_{0,2}$ , т.е. начальный уровень и кривизна экспоненциальной кривой  $\sigma_{0,2}(T)$ , несут информацию не только о видовой принадлежности данного металла в каждой своей точке, но и о влиянии его структурного состояния на формирование видовых переходов в условиях низкотемпературного охрупчивания. При этом фактор проявления видов поведения механических характеристик и, соответственно, видовых переходов между знаковыми температурами является фундаментальным в материаловедении.
5. Высокая точность определения показателей прочности  $\sigma_{0,2}(T_0)$  и референсной температуры  $T_0$ , а также возможность выявления наилучших сплавов в концепции конструкционной пригодности, открывает широкие перспективы для эффективного использования разработанной методологии на практике в области ядерной энергетики. При этом оценка конструкционной пригодности таких сталей

должна проводиться с использованием трёх критериев:  $P_{me}(T_0) \geq 1$  и  $P_{ms}(T_0) > 1$ , а также дополнительного — по степени низкотемпературного охрупчивания (уровню референсной температуры)  $T_0 < T_0^{кр} = 260$  К.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range*, ASTM E 1921 (2005).
2. *Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении*, ГОСТ 25.506-85 (Москва: Изд-во стандартов: 1985).
3. I. Dlouhy, T. Smida, and J. Babjak, *Metallic Mater.*, **48**, No. 6: 345 (2010).
4. K. Wallin, *Nucl. Eng. Design*, **193**, Iss. 3: 317 (1999).
5. С. А. Котречко, А. В. Шиян, Е. Ф. Сорока, Л. И. Чирко, В. Н. Ревка, *Материалы, технологии, инструменты*, **19**, № 2: 20 (2014).
6. С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, *Предельная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции* (Киев: Наукова думка: 2008).
7. Ю. Я. Мешков, С. А. Котречко, А. В. Шиян, *Механическая стабильность металлов и сплавов* (Киев: Наукова думка: 2014).
8. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, *Охрупчивание металлических сплавов в условиях концентрации напряжений. Конструкционные стали и титановые сплавы* (Саарбрюккен, Германия: LAP LAMBERT Acad. Publ.: 2015).
9. А. В. Шиян, *Наукові основи формування раціонального комплексу механічних властивостей конструкційних сталей і титанових сплавів* (Автореф. дис. ... д-ра техн. наук) (Дніпропетровськ: Придніпровська державна академія будівництва та архітектури: 2016).
10. В. Д. Ярошевич, Д. Г. Рывкина, *Физ. мет. металловед.*, **31**, вып. 6: 1293 (1971).
11. A. V. Shiyan, *Steel Transl.*, **43**, Iss. 11: 762 (2013).
12. *Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие* (Ред. В. В. Панасюк) (Киев: Наукова думка, **3**: 1988).
13. А. В. Шиян, *Физическая природа локального напряжения хрупкого разрушения сталей и сварных швов* (Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук) (Киев: Институт металлофизики АН УССР: 1990).
14. Р. В. Гольдштейн, Б. М. Овсянников, Н. И. Волгина, А. В. Капцов, Н. М. Осипенко, А. В. Минашин, *Проблемы прочности*, № 1: 79 (1982).
15. В. Т. Троценко, В. В. Покровский, В. Г. Каплуненко, *Проблемы прочности*, № 1: 5 (1997).
16. В. М. Кошелев, В. В. Покровский, *Проблемы прочности*, № 10: 13 (1981).
17. В. В. Покровский, П. В. Токарев, П. В. Ясний, Б. Т. Тимофеев, В. А. Федорова, *Проблемы прочности*, № 1: 11 (1988).
18. В. І. Ткачов, Л. М. Іваськевич, В. М. Мочульський, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **43**, вип. 5: 53 (2007).
19. О. І. Балицький, Л. М. Іваськевич, В. М. Мочульський, О. М. Голіян, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **45**, вип. 2: 102 (2009).
20. Н. И. Новожилова, Г. Н. Малышев, В. Г. Хотмиров, *Проблемы прочности*,

- № 6: 89 (1981).
21. Yu. Ya. Meshkov and A. V. Shiyan, *Steel*, **48**, Iss. 4: 256 (2018).
  22. В. Н. Грищенко, Ю. Я. Мешков, Ю. А. Полушкин, А. В. Шиян, *Металлофиз. новейшие технол.*, **37**, № 7: 961 (2015).
  23. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, Е. Ф. Сорока, *Механика машин, механизмов и материалов*, **31**, № 2: 47 (2015).
  24. А. В. Шиян, С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, Е. Ф. Сорока, О. П. Носенко, И. С. Фёдорова, *Металознавство та термічна обробка металів*, № 2: 5 (2014).

## REFERENCES

1. *Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range*, ASTM E 1921 (2005).
2. *Raschety i Ispytaniya na Prochnost. Metody Mekhanicheskikh Ispytaniy Metallov. Opredelenie Kharakteristik Treshchinostoykosti (Vyazkosti Razrusheniya) pri Staticheskom Nagruzhении* [Calculations and Strength Tests. Methods of Mechanical Testing of Metals. Determination of Fracture Toughness Characteristics (Fracture Toughness) under Static Loading], GOST 25.506-85 (Moscow: Publ. Standards: 1985) (in Russian).
3. I. Dlouhy, T. Smida, and J. Babjak, *Metallic Mater.*, **48**, No. 6: 345 (2010).
4. K. Wallin, *Nucl. Eng. Design*, **193**, Iss. 3: 317 (1999).
5. S. A. Kotrechko, A. V. Shiyan, E. F. Soroka, L. I. Chirko, and V. N. Revka, *Materialy, Tekhnologii, Instrumenty*, **19**, No. 2: 20 (2014) (in Russian).
6. S. A. Kotrechko and Yu. Ya. Meshkov, *Predelnaya Prochnost. Kristally, Metally, Konstruktsii* [Ultimate Strength. Crystals, Metals, Structures] (Kyiv: Naukova Dumka: 2008) (in Russian).
7. Yu. Ya. Meshkov, S. A. Kotrechko, and A. V. Shiyan, *Mekhanicheskaya Stabilitnost Metallov i Splavov* [Mechanical Stability of Metals and Alloys] (Kyiv: Naukova Dumka: 2014) (in Russian).
8. A. V. Shiyan and Yu. Ya. Meshkov, *Okhrupchivanie Metallicheskh Splavov v Usloviyakh Kontsentratsii Napryazheniy. Konstruktsionnye Stali i Titanovye Splavy* [Embrittlement of Metal Alloys in the Conditions of Stress Concentration. Structural Steel and Titanium Alloys] (Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Acad. Publ.: 2015) (in Russian).
9. A. V. Shiyan, *Naukovi Osnovy Formuvannya Ratsionalnogo Kompleksu Mekhanichnykh Vlastyvostrykh Konstruktsiynykh Staley i Tytanovykh Splaviv* [Scientific Basis for the Formation of a Rational Complex of Mechanical Properties of Structural Steels and Titanium Alloys] (Thesis of Disser. for Dr. Tech. Sci.) (Dnipropetrovsk: Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture: 2016) (in Ukrainian).
10. V. D. Yaroshevich and D. G. Ryvkina, *Fiz. Met. Metalloved.*, **31**, Iss. 6: 1293 (1971) (in Russian).
11. A. V. Shiyan, *Steel Transl.*, **43**, Iss. 11: 762 (2013).
12. *Mekhanika Razrusheniya i Prochnost Materialov. Spravochnoe Posobie* [Mechanics of Fracture and Strength of Materials. Reference Manual] (Ed. V. V. Panasyuk) (Kyiv: Naukova Dumka: 3, 1988) (in Russian).
13. A. V. Shiyan, *Fizicheskaya Priroda Lokalnogo Napryazheniya Khrupkogo*

- Razrusheniya Staley i Svarnykh Shvov* [The Physical Nature of the Local Stress of Brittle Fracture of Steels and Welds] (Thesis of Dissert. for Cand. Phys.-Math. Sci.) (Kyiv: Institute for Metal Physics, Academy of Sciences of USSR: 1990) (in Russian).
14. R. V. Goldshteyn, B. M. Ovsyannikov, N. I. Volgina, A. V. Kaptsov, N. M. Osipenko, and A. V. Minashin, *Problemy Prochnosti*, No. 1: 79 (1982) (in Russian).
  15. V. T. Troshchenko, V. V. Pokrovskiy, and V. G. Kaplunenko, *Problemy Prochnosti*, No. 1: 5 (1997) (in Russian).
  16. V. M. Koshelev and V. V. Pokrovskiy, *Problemy Prochnosti*, No. 10: 13 (1981) (in Russian).
  17. V. V. Pokrovskiy, P. V. Tokarev, P. V. Yasniy, B. T. Timofeev, and V. A. Fedorova, *Problemy Prochnosti*, No. 1: 11 (1988) (in Russian).
  18. V. I. Tkachev, L. M. Ivaskevich, and V. M. Mochulskiy, *Fizyko-Khimichna Mekhanika Materialiv*, Iss. 5: 53 (2007) (in Ukrainian).
  19. O. I. Balytskyi, L. M. Ivaskevych, V. M. Mochulskyi, and O. M. Holiyan, *Fizyko-Khimichna Mekhanika Materialiv*, Iss. 5: 93 (1992) (in Ukrainian).
  20. N. I. Novozhilova, G. N. Malyshev, and V. G. Hotmirov, *Problemy Prochnosti*, No. 6: 89 (1981) (in Russian).
  21. Yu. Ya. Meshkov and A. V. Shiyan, *Steel*, **48**, Iss. 4: 256 (2018).
  22. V. N. Grischenko, Yu. Ya. Meshkov, Ya. A. Polushkin, and A. V. Shiyan, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **37**, No. 7: 961 (2015) (in Russian).
  23. A. V. Shiyan, Yu. Ya. Meshkov, and K. F. Soroka, *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov*, **31**, No. 2: 47 (2015) (in Russian).
  24. A. V. Shiyan, S. A. Kotrechko, Yu. Ya. Meshkov, K. F. Soroka, O. P. Nosenko, and I. S. Fedorova, *Metaloznavstvo ta Termichna Obrobka Metaliv*, No. 2: 5 (2014) (in Russian).