

УДК 669.01:539.4;539.2

А.В. ШИЯН, канд. физ.-мат. наук

старший научный сотрудник отдела физики прочности и разрушения<sup>1</sup>

E-mail: shyian\_av@ukr.net

Ю.Я. МЕШКОВ, член-корр. НАН Украины, д-р техн. наук

главный научный сотрудник отдела физики прочности и разрушения<sup>1</sup>

E-mail: meshkov100@gmail.com

<sup>1</sup>Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, г. Киев, Украина

Статья поступила 29.08.2014.

## ОЦЕНКА КОНСТРУКЦИОННОГО КАЧЕСТВА СТАЛЕЙ ПО ИХ СПОСОБНОСТИ ОКАЗЫВАТЬ СОПРОТИВЛЕНИЕ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ В УСЛОВИЯХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

*Предложен новый параметр для оценки конструкционного качества сталей — мера конструкционного качества  $\mu_{P_{ms}}^{\sigma}$  по остаточной механической стабильности  $P_{ms}$ , отражающая их остаточный резерв сопротивления хрупкому разрушению в условиях концентрации напряжений. Проведен анализ изменения конструкционного качества ряда сплавов под воздействием двух типов концентраторов напряжений в условиях одноосного растяжения и статического изгиба.*

**Ключевые слова:** хрупкая прочность, концентраторы напряжений, механическая стабильность, охрупчиваемость, конструкционное качество

**Введение.** Изложенный в работе [1] феноменологический подход к трактовке состояния хрупкости металла, разработанный на основе концепции механической стабильности и понятия эффекта охрупчивания в результате воздействия различных факторов, в том числе концентраторов напряжений (КН), дал возможность установить, что в условиях концентрации напряжений три характеристики прочности:  $R_x$  — хрупкая прочность,  $\sigma_2$  — прочность образца без КН при критической деформации  $\epsilon_c \approx 2\%$  и  $\sigma_{2c}$  — прочность образца с КН при критической температуре вязко-хрупкого перехода  $T_c$  или  $T_0$  в различных состояниях формируют три различных параметра сопротивления хрупкому разрушению (механической стабильности) —  $K_{ms}$ ,  $P_{ms}$  и  $K_{msc}$ , каждый из которых несет свою собственную функцию в сфере защиты металла от хрупкости:

–  $K_{ms}$  — отражает общий (исходный) запас сопротивления хрупкому разрушению металла как такового:

$$K_{ms} = R_x / \sigma_2, \quad (1)$$

где  $R_x$  — хрупкая прочность металла (или для КС — сопротивление микросколу  $R_{MC}$  [1, 2]) в условиях одноосного растяжения образца без КН;

–  $P_{ms}$  — выявляет остаточный резерв сопротивления хрупкому разрушению (изломостойкости) металла, находящегося под действием КН:

$$P_{ms} = K_{ms} / K_{msc} = \sigma_{2c} / \sigma_2, \quad (2)$$

где  $K_{msc}$  — является мерой охрупчиваемости металла и представляет собой часть запаса сопротивления хрупкому разрушению, потерянного в результате присутствия в образце КН:

$$K_{msc} = R_x / \sigma_{2c} \quad (3)$$

Исходя из этого, в работе [3] была разработана система оценки эффективности охрупчивающего действия КН на конструкционные стали (КС) с различным уровнем прочности  $\sigma_{0,2}$ , пластичности  $\psi_K$  и исходной механической стабильности  $K_{ms}$  в виде конкретной методологии.

Определенный интерес для инженерной практики может представлять также и методика оценки конструкционного качества КС на основе показателя  $P_{ms}$ , отражающего остаточный резерв сопротивления хрупкому разрушению металла в условиях воздействия КН.

**Оценка конструкционного качества сталей.** Разработку методики по оценке конструкционного качества КС проводили на основе базы данных механических свойств сплавов, исследованных в работе [4] и детально проанализированных в рамках концепции механической стабильности в работах [1, 3]. При этом использовали данные испытаний на одноосное растяжение образцов с кольцевым КН (радиус  $r = 0,25$  мм; угол раскрытия  $w = 45^\circ$  — далее концентратор типа К1) и статический трехточечный изгиб образцов с усталостной трещиной (далее концентратор типа К2) и, соответственно, данные критических температур хрупкости  $T_c$ , полученные по условию общей текучести [4] и  $T_0$  — по методике Мастер кривой [5], а также данные испытаний гладких цилиндрических образцов при комнатной температуре испытаний (293 К) и температуре  $T_c$ . В работе использовали также характеристики и параметры, суть которых изложена в работах [1, 3].

Следует напомнить, что конструкционное качество КС в части склонности к охрупчиванию под действием КН отражено в параметре охрупчиваемости  $K_{msc}$ , что в относительной мере выражается показателем меры качества по охрупчиваемости  $\mu_{Kmsc}^{\sigma} = K_{msc} / K_{msc}^{opt.}$  [3], при этом, чем меньше  $\mu_{Kmsc}^{\sigma}$ , тем меньше склонность металла к охрупчиванию и выше его качество по свойству охрупчиваемости.

Учитывая, что характеристика остаточной механической стабильности  $P_{ms} = K_{ms} / K_{msc}$  (2), можно для оптимизированных сплавов, по аналогии с параметрами  $K_{ms}^{opt.}$  и  $K_{msc}^{opt.}$  [3], определить величину оптимальной (наилучшей) величины остаточной механической стабильности сплава  $P_{ms}^{opt.}$  в условиях концентрации напряжений в виде соотношения:

$$P_{ms}^{opt.} = K_{ms}^{opt.} / K_{msc}^{opt.} \quad (4)$$

Таким образом, мерой *конструкционного качества металла*, по аналогии с *мерой механического качества*  $\mu_{Kms}^{\sigma}$ , по механической стабильности  $K_{ms}$  при заданной прочности  $\sigma_{0,2}$  и *мерой качества по охрупчиваемости*  $\mu_{Kmsc}^{\sigma}$ , т. е. по доле механической стабильности  $K_{msc}$ , потерянной в результате охрупчивания образца с КН, целесообразно называть меру  $\mu_{Pms}^{\sigma}$  по доле остаточной механической стабильности  $P_{ms}$ , соотнесенной к ее оптимальной (наилучшей) величине  $P_{ms}^{opt.}$ , сохраненной после охрупчивания образца с КН:

$$\mu_{Pms}^{\sigma} = P_{ms} / P_{ms}^{opt.} (K_{ms} / K_{msc}) \cdot (K_{msc}^{opt.} / K_{ms}^{opt.}) = \mu_{Kms}^{\sigma} / \mu_{Kmsc}^{\sigma} \quad (5)$$

Таким образом, мера конструкционного качества КС  $\mu_{Pms}^{\sigma}$  отражает степень превышения исходного уровня механического качества  $\mu_{Kms}^{\sigma}$  над качеством  $\mu_{Kmsc}^{\sigma}$ , потерянным за счет охрупчиваемости, т. е. представляет собой остаточное качество металла в условиях концентрации напряжений.

Здесь важно отметить, что согласно (5) величина параметра  $\mu_{Pms}^{\sigma}$  определяется не только начальной прочностью данного сплава  $\sigma_{0,2}$  (через  $K_{ms}^{opt.}$ ), но и его конечной прочностью  $\sigma_{0,2c}$  (через  $K_{msc}^{opt.}$  с заменой параметра  $\sigma_{0,2}$  на  $\sigma_{0,2c}$  [3]), поэтому верхний индекс в обозначении  $\mu_{Pms}^{\sigma}$  имеет вышеуказанный смысл по показателям прочности, в отличие от соответствующего индекса в обозначении параметра  $\mu_{Kms}^{\sigma}$ , где он носит смысл только заданной начальной прочности  $\sigma_{0,2}$ , а у параметра  $\mu_{Kmsc}^{\sigma}$  — конечной прочности  $\sigma_{0,2c}$ . Таким образом, согласно (5), указанное свойство параметра  $\mu_{Pms}^{\sigma}$  зависит от отношения конечной  $\mu_{Kmsc}^{\sigma}$  (с КН) и исходной  $\mu_{Kms}^{\sigma}$  (без КН) мер качества КС — чем ближе величина  $\mu_{Kms}^{\sigma} / \mu_{Kmsc}^{\sigma}$  к единице, тем ближе критическая температура хрупкости  $T_c$  или  $T_0$  к комнатной (293 К), а величина параметра  $\mu_{Pms}^{\sigma} \rightarrow 1$  означает падение уровня качества сплава.

В работе [6] было установлено, что КС можно разделить на два вида в зависимости от типа экстре-

му (минимум или максимум) на параболических зависимостях  $\Psi_K = f(\sigma_{0,2})$  при условии  $K_{ms} = \text{const}$ , которые описывают взаимосвязь свойств «пластичность — прочность — механическая стабильность» этих сплавов, а в [3] было введено понятие видовой перепада, отражающее сохранение или изменение принадлежности сплава определенному виду в конечном состоянии (с наличием КН при критической температуре хрупкости  $T_c$  или  $T_0$ ) по отношению к начальному состоянию (без КН при 293 К). При этом следует помнить, что переход сплава из 1-го вида во 2-ой (видовой переход 1–2) при условии  $\sigma_{0,2} > \sigma_{0,2}^{kp.}$  (где  $\sigma_{0,2}^{kp.}$  — критическая величина прочности, определяющая условие разделения сплавов на виды [3, 6]), отражает повышение степени его охрупчиваемости  $K_{msc}$  и свидетельствует о существенной потере пластических свойств  $\Psi_K$ , что, естественно, ведет к снижению уровня остаточной механической стабильности  $P_{ms}$ . В итоге, это приводит к снижению меры конструкционного качества  $\mu_{Pms}^{\sigma}$  по (5) и отражает снижение качества сплава, находящегося под действием КН. Если же видовой переход 1–2 происходит при условии  $\sigma_{0,2} \leq \sigma_{0,2}^{kp.}$  (характерно для КС низкой прочности), то имеет место обратная ситуация — уровень  $P_{ms}$  растет, а параметр  $\mu_{Pms}^{\sigma}$  по (5) отражает повышенное качество КС в условиях концентрации напряжений. Подобным образом трактуется видовой переход 2–1, с тем лишь отличием, что происходит обратная ситуация: при  $\sigma_{0,2} > \sigma_{0,2}^{kp.}$  (характерно для КС средней и высокой прочности) параметры  $P_{ms}$  и  $\mu_{Pms}^{\sigma}$  растут, что отражает повышение качества сплава, находящегося под действием КН, а при  $\sigma_{0,2} \leq \sigma_{0,2}^{kp.}$  имеет место падение качественных показателей, что связано со снижением величин параметров  $P_{ms}$  и  $\mu_{Pms}^{\sigma}$ . Конкретные примеры таких сложных, но, тем не менее, связанных между собой изменений свойств сплавов, находящихся в различных условиях (без КН и под действием КН), будут рассмотрены ниже.

**Анализ изменения конструкционного качества сталей под воздействием КН.** На рисунке представлена общая схема изменения характеристик механической стабильности  $K_{ms}$ ,  $P_{ms}$  и меры конструкционного качества  $\mu_{Pms}^{\sigma}$  исследованных КС под воздействием КН — типа К1 и предельного (трещина) К2 в различных условиях напряженно-деформированного состояния (НДС), а также некоторые зависимости, необходимые для анализа.

Для удобства анализа некоторые наиболее показательные сплавы, подвергаемые рассмотрению ниже, обозначены на рисунке буквенными символами согласно [1, 3, 4]. В таблице приведены значения характеристик механической стабильности  $K_{ms}$ ,  $K_{msc}$  и  $P_{ms}$  [1, 3], а также меры конструкционного качества  $\mu_{Pms}^{\sigma}$  по (5).

Результаты анализа, представленные на рисунке и в таблице, показали, что мера конструкционного

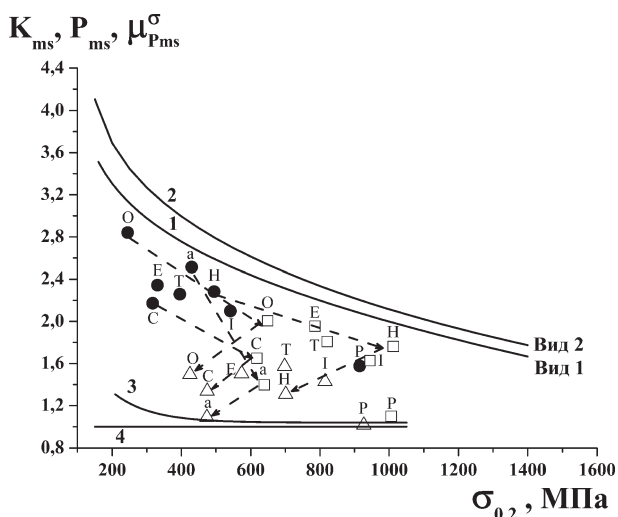


Рисунок — Общая схема изменения характеристик механической стабильности  $K_{ms}$ ,  $P_{ms}$  и меры конструкционного качества  $\mu_{Pms}^\sigma$  для наиболее показательных сплавов из исследованной выборки КС [1, 3, 4]. Зависимости: оптимальных значений механической стабильности  $K_{msc}^{opt}$  от прочности  $\sigma_{0,2}$  для сплавов 1-го (кривая оптимизации 1) и 2-го (кривая оптимизации 2) видов; нижней границы меры конструкционного качества  $\mu_{Pms}^\sigma$  от прочности  $\sigma_{0,2}$  для КН типа К1 (кривая 3) и типа К2 (кривая 4). Экспериментальные данные:  $\bullet$  — ( $\sigma_{0,2}$ ,  $K_{ms}$ );  $\square$  — ( $\sigma_{0,2C}$ ,  $P_{ms}$ ) для КН типа К1;  $\Delta$  — ( $\sigma_{0,2C}$ ,  $P_{ms}$ ) для КН типа К2; штриховые стрелки — направления изменения конструкционного качества

качества КС  $\mu_{Pms}^\sigma$  по (5) является сложной функцией таких факторов, как видовой переход, начальная  $\sigma_{0,2}$  и конечная  $\sigma_{0,2C}$  прочность, начальная  $\sigma_2$  и конечная  $\sigma_{2C}$  прочность при деформации  $e_c \approx 2\%$  и имеет различные проявления с точки зрения сопротивления охрупчиванию под воздействием КН:

- сплавы «О», «а» и «Н» являются одними из наилучших по показателю  $K_{ms}$  при разных уровнях начальной прочности  $\sigma_{0,2}$  в условиях отсутствия КН. Последствия воздействия КН обоих типов К1 и К2 на сплавы «О» и «Н» оставляют их в ряду высококачественных по показателю конструкционного качества  $\mu_{Pms}^\sigma$ , тогда как для сплава «а» эти воздей-

ствия являются пагубными и переводят его в разряд среднего уровня качества по  $\mu_{Pms}^\sigma$  при КН типа К1, а при предельном КН типа К2 — на низкий уровень качества по  $\mu_{Pms}^\sigma$ , что свидетельствует о весьма низкой сопротивляемости охрупчиванию этого сплава (показано пунктирными линиями со стрелками на рисунке);

- сплавы «Е», «Т» и «I», имеющие достаточно высокий (но не высший) уровень  $K_{ms}$  в условиях отсутствия КН, сохраняют высокий уровень конструкционного качества  $1,19 \leq \mu_{Pms}^\sigma \leq 1,46$  при воздействии обоих типов КН, что свидетельствует о высокой сопротивляемости охрупчиванию этих сплавов;

- сплав «С», имеющий сравнительно низкий уровень механической стабильности  $K_{ms}$  в условиях отсутствия КН, проявляет хорошую сопротивляемость охрупчиванию по  $P_{ms}$  под воздействием КН обоих типов и удовлетворительные качественные показатели по  $\mu_{Pms}^\sigma$  (показано пунктирными линиями со стрелками на рисунке);

- высокопрочный сплав «Р» высокого механического качества при отсутствии КН в определенной мере сохраняет свойство сопротивляемости охрупчиванию ( $K_{ms}$ ) под воздействием КН типа К1, однако теряет конструкционное качество ( $\mu_{Pms}^\sigma$ ) под воздействием предельного КН типа К2, что, в принципе, характерно для сталей такого класса прочности.

Проведенный анализ показал хорошее соответствие результатам, полученным в [1], и, кроме того, позволил обозначить границы, которые характеризуют нижний предельный уровень конструкционного качества КС по показателю  $\mu_{Pms}^\sigma$  при воздействии КН в исследованной области изменения прочности  $190 \text{ МПа} \leq \sigma_{0,2} \leq 1050 \text{ МПа}$ . Для КН типа К1 его можно описать зависимостью (кривая 3 на рисунке):

$$\mu_{Pms}^\sigma = a \cdot \exp(-\sigma_{0,2}/b) + c, \quad (6)$$

Таблица — Значения характеристик механической стабильности  $K_{ms}$ ,  $K_{msc}$  и  $P_{ms}$  [1], а также меры конструкционного качества  $\mu_{Pms}^\sigma$  при воздействии КН типа К1 и К2 для показательной выборки КС

Тип КН	Параметр	Обозначение КС согласно [1, 3, 4]							
		«О» FeMn	«С» FeMn	«Е» FeMn	«Т» CrNi	«а» St.TR	«Н» CrMoV	«I» CrNi	«Р» FeMn
гладкий образец (при 293 К)	$K_{ms}$ (1)	2,84	2,17	2,34	2,26	2,51	2,28	2,10	2,75
К1 (при $T_c$ )	$K_{msc}$ (3)	1,42	1,32	1,20	1,25	1,80	1,30	1,29	1,60
К2 (при $T_0$ )		1,90	1,63	1,56	1,44	2,31	1,75	1,47	2,12
К1 (при $T_c$ )	$P_{ms}$ (2)	2,01	1,65	1,95	1,81	1,40	1,76	1,63	1,10
К2 (при $T_0$ )		1,50	1,34	1,50	1,57	1,09	1,31	1,43	1,02
К1 (при $T_c$ )	$\mu_{Pms}^\sigma$ (5)	1,59	1,36	1,46	1,38	1,24	1,41	1,27	1,05
К2 (при $T_0$ )		1,34	1,20	1,31	1,28	1,10	1,22	1,19	1,01

где  $a = 1,860$ ;  $b = 108,066$ ;  $c = 1,038$  — эмпирические коэффициенты, а для КН типа К2 это будет постоянный предельный уровень (кривая 4 на рисунке):

$$\mu_{Pms}^{\sigma} = \text{const} = 1, \quad (7)$$

который обуславливает равенство  $T_0 = 293$  К.

Исходя из вышесказанного, наивысшими величинами конструкционного качества  $\mu_{Pms}^{\sigma}$  в исследованной выборке КС обладают следующие сплавы: под воздействием КН типа К1 — низкой прочности «О» ( $\sigma_{0,2} = 245$  МПа) и средней прочности: «Е» ( $\sigma_{0,2} = 331$  МПа), «Т» ( $\sigma_{0,2} = 396$  МПа) и «Н» ( $\sigma_{0,2} = 495$  МПа), а сохранение наивысшего уровня качества под воздействием КН типа К2 наблюдается только у сплавов «О», «Е» и «Т».

В заключение важно заметить, что степень отличия остаточного резерва механической стабильности  $P_{ms}$  (образцы с КН) от исходного запаса механической стабильности  $K_{ms}$  (образцы без КН) является не только наглядной, но и количественной мерой особого механического свойства КС — свойства охрупчиваемости от КН, равно как и степень отличия меры конструкционного качества  $\mu_{Pms}^{\sigma}$  (с КН) от меры исходного механического качества  $\mu_{Kms}^{\sigma}$  (без КН) является наглядным и количественным показателем изменения конструкционного качества (структурно-механического охрупчивания) КС в условиях концентрации напряжений.

**Выводы.** 1. Три характеристики прочности:  $R_x$  — хрупкая прочность,  $\sigma_{0,2c}$  — прочность образца с концентратором напряжений при критической температуре вязко-хрупкого перехода  $T_c$  или  $T_0$  и  $\sigma_2$  — прочность металла при критической деформации  $e_c \approx 2\%$  в различных состояниях формируют три различных параметра сопротивления хрупкому разрушению (механической стабильности) —  $K_{ms}$ ,  $P_{ms}$  и  $K_{msc}$ , каждый из которых несет свою собственную функцию в сфере защиты металла от хрупкости:

-  $K_{ms}$  — отражает общий (исходный) запас сопротивления хрупкому разрушению металла как такового;

-  $P_{ms}$  — выявляет остаточный резерв сопротивления хрупкому разрушению металла, находящегося под действием концентратора напряжений;

-  $K_{msc}$  — является мерой охрупчивания металла и представляет собой часть запаса сопротивления хрупкому разрушению, потерянного в результате присутствия в образце концентратора напряжений.

2. Для оценки категории качества конструкционных сталей в различных условиях НДС предложены три количественных параметра:

-  $\mu_{Kmsc}^{\sigma}$  — мера исходного механического качества по механической стабильности  $K_{ms}$ , соотнесенной с оптимальной величиной  $K_{ms}^{\text{опт}}$ , при заданной прочности  $\sigma_{0,2}$ ;

-  $\mu_{Kmsc}^{\sigma}$  — мера качества по охрупчиваемости, отражающая долю механической стабильности  $K_{msc}$ , потерянной в результате охрупчивания образца с концентратором напряжений, соотнесенную с оптимальной величиной этого показателя  $K_{ms}^{\text{опт}}$ . В отличие от меры исходного механического качества  $\mu_{Kms}^{\sigma}$ , мера качества по охрупчиваемости  $\mu_{Kmsc}^{\sigma}$  содержит противоположный смысл — качество сплава по охрупчиваемости тем выше, чем меньше показатель  $\mu_{Kmsc}^{\sigma}$ ;

-  $\mu_{Pms}^{\sigma}$  — мера конструкционного качества, отражающая долю механической стабильности  $P_{ms}$ , сохраненную после охрупчивания образца с концентратором напряжений, соотнесенную с оптимальной (наилучшей) величиной этого показателя  $P_{ms}^{\text{опт}}$ .

3. Конструкционные стали имеют различную сопротивляемость охрупчиванию под воздействием концентраторов напряжений, которая зависит от таких факторов, как видовой переход, начальная  $\sigma_{0,2}$  и конечная  $\sigma_{0,2c}$  прочность, начальная  $\sigma_2$  и конечная  $\sigma_{2c}$  прочность при критической степени деформации  $e_c \approx 2\%$ . Видовой переход и соответствующая комбинация указанных значений прочности определяют конструкционное качество данного сплава.

#### Список условных обозначений

КН — концентраторы напряжений;

КС — конструкционные стали;

К1, К2 — типы концентраторов напряжений;

НДС — напряженно-деформированное состояние.

#### Список литературы

1. Мешков, Ю.Я. Проблема хрупкости конструкций / Ю.Я. Мешков, А.В. Шиян // Механика машин, механизмов и материалов. — 2015. — № 1(30). — С. 30–36.
2. Котречко, С.А. Предельная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции / С.А. Котречко, Ю.Я. Мешков. — Киев: Наук. думка, 2008. — 295 с.
3. Шиян, А.В. Методические основы определения критической температуры хрупкости сталей в условиях концентрации напряжений / А.В. Шиян, Ю.Я. Мешков, К.Ф. Сорока // Механика машин, механизмов и материалов. — 2015. — № 2(31). — С. 47–52.
4. Smida, T. Prediction of fracture toughness temperature dependence from tensile test parameters / T. Smida, J. Babjak, I. Dlouhy // Kovove Mater. — 2010. — 48. — Pp. 1–8.
5. ASTM E 1921: Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range. — 2005.
6. Взаимосвязь свойств прочности, пластичности и механической стабильности конструкционных сталей / А.В. Шиян [и др.] // Металловедение и термич. обработка металлов. — 2013. — № 4. — С. 12–30.



SHIYAN Artur V., Cand. Phys.-Math. Sc.

Senior Researcher of the Department of Physics of Strength and Fracture<sup>1</sup>

E-mail: shyan\_av@ukr.net

MESHKOV Yuriy Ya., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dr. Techn. Sc.

Chief Researcher of the Department of Physics of Strength and Fracture<sup>1</sup>

E-mail: meshkov100@gmail.com

<sup>1</sup>Kurdymov Institute of Metal Physics, Ukrainian National Academy of Sciences, Kiev, Ukraine

Received 29 August 2014.

## ASSESSMENT OF THE QUALITY OF STRUCTURAL STEELS BY THEIR ABILITY TO RESIST BRITTLE FRACTURE UNDER THE STRESS CONCENTRATION

*New parameter for assessment of structural quality — the measure of structural quality  $\mu_{Pms}^s$  by the residual mechanical stability  $P_{ms}$  is offered. It exhibits their residual possibility to resist embrittlement under the stress concentration. The analysis of changes in structural quality of a number of alloys under the effect of two types of stress raisers at uniaxial tension and static bending is executed.*

**Keywords:** brittle strength, stress raisers, mechanical stability, tendency to embrittlement, structural quality

### References

1. Meshkov Yu.Ya., Shiyani A.V. Problema hrupkosti konstrukcij [The problem of brittleness of structures]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2015, no. 1(30), pp. 30–36.
2. Kotrechko S.A., Meshkov Yu.Ya. *Predel'naya prochnost'. Kristally, metally, konstruktsii* [Limiting Strength of Crystals, Metals, and Structures]. Kiev, Naukova Dumka, 2008.
3. Shiyani A.V., Meshkov Yu.Ya., Soroka K.F. Metodicheskie osnovy opredelenija kriticheskoj temperatury hrupkosti stalej v uslovijah koncentracii naprjazhenij [Methodological principles for the assessment of critical temperature of brittleness of steels at stress raise]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2015, no. 2(31), pp. 47–52.
4. Smida T., Babjak J., Dlouhy I. *Prediction of fracture toughness temperature dependence from tensile test parameters*. Kovove Mater., 2010, no. 48, pp. 1–8.
5. ASTM E 1921: Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range. 2005.
6. Shiyani A.V., Kotrechko S.A., Meshkov Yu.Ya. [et al.]. Vzaimosvjaz' svojstv prochnosti, plastichnosti i mehanicheskoj stabil'nosti konstrukcionnyh stalej [Relation between strength, ductility and mechanical stability of structural steels]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov* [Metal science and heat treatment of metals], 2013, no. 4, pp. 12–30.