

УДК 669.01:539.4;539.2

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

А.В. ШИЯН, д-р техн. наук  
старший научный сотрудник отдела физики прочности и разрушения<sup>1</sup>  
E-mail: shyian\_av@ukr.net

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

Поступила в редакцию 17.01.2017.

## К ВОПРОСУ О ВЗАИМОСВЯЗЯХ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА С ПРОЧНОСТЬЮ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ

*На основе анализа ранее полученных авторами экспериментальных данных в статье развита новая методология оценки способности конструкционных сталей сопротивляться охрупчивающему действию концентраторов напряжений (КН), проявляющемуся в виде потери несущей способности  $\sigma_{NF}$  образцов с кольцевым надрезом. Введено понятие о резерве прочности металла (изломостойкость  $V_r$ ), выполняющем функцию «гашения» пиковых локальных перенапряжений в зоне КН, блокирующих возможное снижение прочности изделия. Установлены критические значения изломостойкости  $V_{rb} \approx 1,6...2,2$  на образцах с надрезом для сталей с различным уровнем прочности в интервале  $\sigma_{0,2} \approx 300...1500$  МПа. Предлагается использовать понятие конструкционной пригодности сплава для изделия, содержащего КН с известным показателем  $V_{rb}$ . Критерием конструкционной пригодности служит условие  $V_r \geq V_{rb}$ . Характерным признаком конструкционной пригодности сплава для изделия с КН является монотонное увеличение конструкционной прочности изделия ( $\sigma_{NF}$ ) с ростом прочности металла  $\sigma_{0,2}$ , что свидетельствует об отсутствии угрозы охрупчивания данного изделия от имеющихся КН.*

**Ключевые слова:** деформационная стойкость, изломостойкость, несущая способность, концентрация напряжений, конструкционная пригодность

**Введение. Постановка задачи.** Прочность металлических конструкций и сооружений определяется в первую очередь прочностью используемых конструкционных материалов. Однако для многих материалов, в том числе для конструкционных металлов и сплавов, упомянутая связь не является вполне однозначной и порою становится даже противоречивой, когда с увеличением прочности металла (сплава) конструкционная прочность изделия — несущая способность элемента конструкции (ЭК) — напротив, снижается. Часто это проявляется в виде аварий или катастрофических разрушений. Подобные случаи принято объяснять проявлением хрупкости материалов, но чаще всего это связано лишь с начальной стадией проявления хрупкости — с охрупчиванием материала вследствие действия факторов внешнего влияния на прочность (низкая температура, динамика нагружения, облучение и пр.) в сочетании с факторами напряженно-деформированного состояния (НДС) в ЭК.

Поскольку при понижении температуры предпосылкой охрупчивания металла в изделии является излишнее повышение уровня прочности ( $\sigma_{0,2}$  — условный предел текучести), то для каждого ЭК с его видом НДС целесообразно установить предел рационального упрочнения сплава на по-

роге возникновения начальных признаков потери несущей способности ЭК.

В контексте взаимосвязи показателей прочности в образцах металла и его прочности в ЭК представляется возможным уточнить понятие о таком свойстве, как конструкционная пригодность данного материала для данной конструкции. Наглядной иллюстрацией понятия конструкционной пригодности может служить сравнение поведения стеклянного и металлического стержней при их изгибе даже при одинаковом уровне их прочности на растяжение. Для металлических сплавов естественным признаком надлежащей конструкционной пригодности может служить эффект увеличения конструкционной прочности изделия (несущей способности ЭК) при увеличении прочности материала. В противном случае конструкционная пригодность этого материала для данного ЭК должна характеризоваться как сомнительная. Поэтому разработка критерия для оценки предела рационального упрочнения материала для данного ЭК вполне актуальна для современного материаловедения. Такова постановка задачи в рамках предлагаемой статьи.

**Неоднородности силовых полей — главная предпосылка снижения прочности ЭК.** Для материалов с ограниченной пластичностью наиболее пока-

зательными испытаниями на конструкционную пригодность являются испытания на ломкость образца при изгибе. В этом случае фактором риска служит элементарная неоднородность НДС по сечению, где в крайнем растянутом волокне локальные значения напряжения и деформации заведомо могут превышать рубежи предела текучести материала — по напряжению  $\sigma_{0,2}$  и по деформации  $e = 0,002$ . Очевидно, что для успешного сопротивления ЭК деформированию при неоднородном НДС кроме базового уровня прочности  $\sigma_{0,2}$  материалу требуется еще дополнительный резерв прочности, позволяющий за счет резерва деформационного упрочнения «гасить» локальные избыточные напряжения, превышающие предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , обеспечивая металлу определенную деформационную стойкость. Мэру этой деформационной устойчивости можно приближенно оценить уже в результате стандартного лабораторного испытания образцов на разрыв по величине  $S_K$  — истинного напряжения при разрыве с «шейкой» в виде отношения, использованного в [1]:

$$B_r = S_K / \sigma_{0,2}, \quad (1)$$

где  $B_r$  — мера деформационной стойкости металла в условиях его перенагружения выше предела текучести  $\sigma_{0,2}$  при практически одноосном растяжении [1] (незначительным стеснением пластичности металла в «шейке» образца в данном случае можно пренебречь).

В работе [2] показатель  $B_r$  по (1) характеризовался как показатель изломостойкости металла ( $B_r$  — break resistance) в связи с тем, что разрушение образца в «шейке» четко проявляет эффект ломкости в момент, когда нагружение завершается мгновенным разрывом, т. е. изломом с резким звуковым эффектом. По сути ломкость подобна «квазихрупкости», но с проявлением не микро-, а макропластичности перед разрывом.

В традиционном материаловедении основное внимание уделяется характеристике прочности  $\sigma_{0,2}$  (или  $\sigma_B$  — временное сопротивление разрыву [3]), а такой показатель, как  $S_K$ , который характеризует определенный деформационный резерв сопротивления материала разрушению, практически не используется ни в технологических поисках металловедов, ни в расчетных процедурах конструкторов. Неявно этот резерв проявляется в характеристике пластичности металла  $\psi_K$  — относительное сужение образца в момент разрыва в «шейке». Но  $\psi_K$  не самостоятельная механическая характеристика, она целиком зависит от величины  $S_K$  и от темпа деформационного упрочнения металла в «шейке»  $n$  ( $n$  — показатель деформационного упрочнения по Холломону [4]). Поэтому пластичность  $\psi_K$ , являясь по сути физической предпосылкой, обеспечивающей конструкционную пригодность материала, все же сама по себе не может в принципе служить количественной

мерой этой пригодности, что подтверждено более чем столетней практикой инженерных расчетов прочности, в которых для обеспечения желаемой конструкционной надежности ЭК используется коэффициент запаса прочности  $K_{зп}$ , но не показатели пластичности или вязкости металла.

Однако подлинными резервами силовой надежности ЭК заключаются не в величине  $K_{зп}$ , но их можно обнаружить в самом свойстве прочности, если расширить привычное понятие свойства прочности, включив в него кроме базовой прочности  $\sigma_{0,2}$  еще и резерв деформационной стойкости на этапе деформационного упрочнения металла. В сущности, учет деформационных резервов упрочнения металла уже давно используется в инженерных расчетах прочности на основе деформационных критериев разрушения [5] для изделий, содержащих концентраторы напряжений (КН). Тем не менее, мы полагаем, что в качестве следующего шага в использовании резервов деформационного упрочнения традиционный расчет изделий на допускаемую нагрузку можно дополнить расчетом меры конструкционной пригодности выбранного для данного изделия материала. Очевидно, что для этого потребуются сформулировать понятие, критерий и дать меру такого механического свойства.

В настоящей статье сделана попытка на примере модельных образцов, имитирующих действие неоднородных силовых полей, продемонстрировать эффективность предлагаемых подходов к оценке конструкционной пригодности металлов. Предметом исследования была прочность образцов с надрезом  $\sigma_{NF}$  (среднее номинальное напряжение разрушения в условиях одноосного растяжения).

Конструкционную пригодность металла для данного изделия мы определяем как его способность не проявлять первичных признаков охрупчивания (в виде снижения несущей способности изделия  $\sigma_{NF}$ ) в случае непредусмотренного повышения предела прочности металла ( $\sigma_{0,2}$ ), например, от снижения температуры.

Критерий предельной конструкционной пригодности — достижение максимума несущей способности ( $\sigma_{NFmax}$ ) вследствие роста  $\sigma_{0,2}$ .

В качестве основного признака надлежущей конструкционной пригодности металла для данного вида ЭК (образец с надрезом) было выбрано соответствие между прочностью металла и прочностью ЭК, т. е. увеличение несущей способности образца с надрезом  $\sigma_{NF}$  должно следовать за повышением уровня прочности металла  $\sigma_{0,2}$ . Оказалось, что при этом существенную роль играет способ повышения  $\sigma_{0,2}$  — структурный (состав стали и термообработка) или бесструктурный (температурный). Для решения этой задачи в полной мере понадобится привлечь понятие резерва прочности в виде показателя силовой выносливости  $B_r$ , ха-

рактически характеризующего сопротивление металла ломкости — изломостойкость [2].

**Два вида резервов прочности.** Силовые резервы прочности металла содержатся в показателях, заведомо превышающих характеристику  $\sigma_{0,2}$ . Следует различать два принципиально разных вида резервов прочности металла:

- первый вид заключается в показателе силовой выносливости — изломостойкости  $B_r$  по (1);
- второй вид базируется на том неопровержимом факте, что характеристика хрупкой прочности любого сплава  $R_x$  (для сталей — сопротивление микросколу  $R_{MC}$ , которое реализуется при температуре вязко-хрупкого перехода  $T_{BX}$  [6]) с данной структурой непременно превышает предел текучести  $\sigma_{0,2}$  этого сплава —  $R_x > \sigma_{0,2}$  и разница  $R_x - \sigma_{0,2}$  означает интервал возможных значений прочностей  $\sigma_{0,2}$  для металла с данной структурой, в котором его хрупкость (при растяжении) не достигается, поскольку  $R_x > \sigma_{0,2}$ . Следовательно, отношение  $R_x / \sigma_{0,2} > 1$  является индикатором такого резерва прочности, который отражает запас сопротивления переходу к хрупкому состоянию сплава при растяжении. В этом интервале прочностей ( $R_x - \sigma_{0,2}$ ) металл проявляет свойство своей механической стабильности в том смысле, что разрушению непременно будет предшествовать та или иная степень пластической деформации, т. е. разрушение не может быть хрупким [7].

В работах [7, 8] в качестве параметра стабильности  $K_{ms}$  (коэффициент механической стабильности) было представлено несколько отличное от  $R_x / \sigma_{0,2}$  отношение:

$$K_{ms} = R_x / \sigma_2, \quad (2)$$

где  $\sigma_2$  — прочность сплава при критической деформации  $e_c = 2\%$ .

Таким образом, обобщенное понятие прочности металла включает в себя базовую (основную) прочность  $\sigma_{0,2}$  и два вида резервов прочности: резерв по силовой выносливости металла  $B_r$  (изломостойкость) и резерв по сопротивлению хрупкости  $K_{ms}$  (механическая стабильность). У этих двух резервов разные задачи: резерв силовой выносливости  $B_r$  защищает металл от локальных пиковых перенапряжений в местах неоднородностей НДС (изгиба, концентрации напряжений), а резерв механической стабильности  $K_{ms}$  защищает металл от перехода в состояние хрупкости из-за непредвиденного увеличения прочности  $\sigma_{0,2}(\sigma_2)$  от снижения температуры, жесткости НДС, динамики нагружения, радиационного упрочнения и пр.

Ниже будет продемонстрировано, как повышение уровня прочности  $\sigma_{0,2}$  может проявиться в виде потери несущей способности  $\sigma_{NF}$ , что обуславливает порог допустимого повышения уровня прочности вследствие развития эффекта охрупчивания стали под действием неоднородностей НДС в образцах с надрезом.

**Критерий допустимого увеличения прочности стали в данном ЭК.** Тенденция к понижению пластичности и увеличению риска охрупчивания стали при росте показателя прочности  $\sigma_{0,2}$  общеизвестна. Однако предельные рубежи безопасного повышения прочности для каждого ЭК различны из-за различия факторов НДС. Поэтому исследования по установлению пределов рационального увеличения уровня прочности сталей в работе [1] проводили на примере конкретного вида НДС на образцах диаметром 8 мм с нанесенным кольцевым надрезом ( $r = 0,25$  мм) глубиной 1,4 мм, при этом теоретический коэффициент концентрации напряжений по Нейберу составлял  $\alpha_c \approx 3,2$  [9]. Создаваемые надрезом неоднородности НДС позволяют рассматривать такие образцы, как своеобразную модель ЭК, подходящую для выявления основных закономерностей по влиянию базовой прочности металла в сочетании с показателями резервов прочности на эффективность действия охрупчивающего фактора КН. Признаком начала охрупчивающего действия КН служило снижение напряжения разрыва надрезанного образца  $\sigma_{NF}$

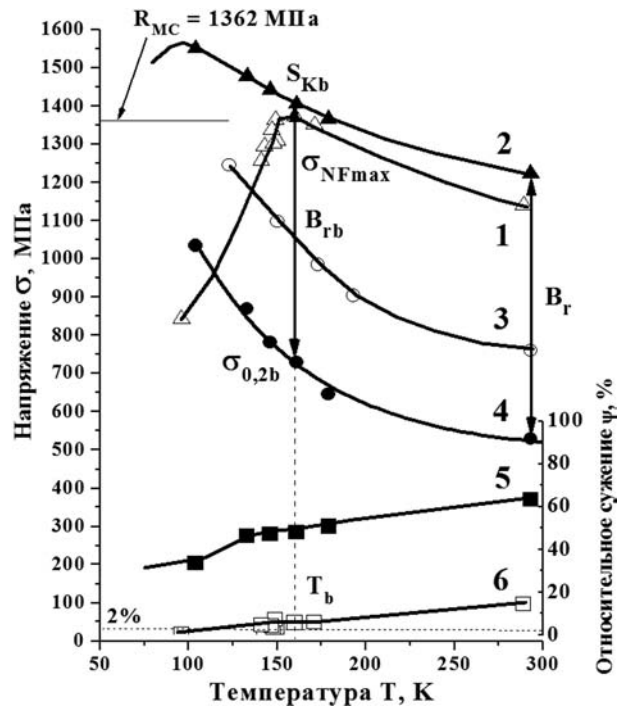


Рисунок 1 — Температурные зависимости стали 40 (нормализация 880 °С) по результатам испытаний гладких образцов и образцов с КН [2]: 1 — среднего номинального напряжения разрушения образцов с КН; 2 — истинного напряжения в момент разрушения гладкого образца  $S_K$ ; 3 — напряжение общей текучести  $\sigma_{0,2}$ ; 4 — условного предела текучести  $\sigma_{0,2b}$ ; 5 — относительного сужения в момент разрушения гладкого образца  $\psi_K$ ; 6 — то же для образца с КН  $\psi_{NF}$ ; экспериментальные данные: темные знаки — без КН; светлые знаки — под действием КН;  $R_{MC}$  — хрупкая прочность стали;  $T_b$  — критическая температура в момент начала охрупчивания; критические прочностные при  $T_b$ ;  $\sigma_{NFmax}$  — максимальное значение несущей способности образца с надрезом;  $\sigma_{0,2b}$  — условный предел текучести;  $S_K$  — истинное напряжение в момент разрушения гладкого образца; изломостойкости:  $B_r$  — исходная при 293 К;  $B_{rb}$  — критическая при  $T_b$

при увеличении прочности стали  $\sigma_{0,2}$ , например, в результате понижения температуры испытания (рисунок 1) [2].

На рисунке 1 представлено изменение прочности образцов с надрезом, обусловленное снижением температуры испытаний [2]. Видно, что наиболее выразительным признаком приближения катастрофической ломкости образцов, содержащих КН, являются не показатели пластичности надрезанных образцов  $\psi_N$ , а величина номинального напряжения разрушения  $\sigma_{NF}$ , которая в момент начала охрупчивания обнаруживает резкое падение  $\sigma_{NF}$  после максимума при критической температуре  $T_b$ . Критическое значение показателя изломостойкости  $B_{rb}$  в точке максимума  $\sigma_{NF}$  для данного надреза составляет величину  $B_r = 1,8$  [1]. В работе [1] были определены показатели  $B_r$  для широкого круга конструкционных сталей с различной структурой и составом, как при комнатной температуре, так и в интервале температур ниже комнатной.

Было установлено, что снижение температуры испытаний сопровождается повышением несущей способности образцов с надрезом  $\sigma_{NF}$  лишь до критических значений прочности  $\sigma_{0,2b} = 730$  МПа (сталь 40 нормализованная) и  $\sigma_{0,2b} = 1230$  МПа (сталь 30ХГСА улучшенная), которым соответствуют критические показатели изломостойкости  $B_{rb} = 1,87$  и  $B_{rb} = 1,59$  (таблица 1). При этом несущая способность  $\sigma_{NF}$  образцов поднималась до максимального уровня 1374 МПа (сталь 40) и до 2246 МПа (сталь 30ХГСА), что и следует понимать как соответствующие пределы рационального упрочнения для данного вида ЭК в слу-

чае неструктурного (здесь — температурного) способа повышения  $\sigma_{0,2}$ .

Из таблицы 1 видно, что возможности увеличения конструкционной прочности при неструктурных способах упрочнения, например, температурном, динамическом или субструктурном (старение, рациональное упрочнение) весьма ограничены, поскольку они основаны непосредственно на исчерпании прочностного резерва механической стабильности ( $R_X - \sigma_{0,2}$ ) за счет снижения показателя механической стабильности  $K_{ms}$ , т. е. на прямом исчерпании резерва сопротивления хрупкости металла. Поэтому такое повышение несущей способности  $\sigma_{NF}$  не представляет никакого технологического интереса, однако рубежи предельно допустимого роста прочности  $\sigma_{0,2}$  в таких случаях выявляются весьма четко (рисунок 2).

Реальная практика повышения несущей способности изделий ( $\sigma_{NF}$ ) всегда базируется исключительно на структурном способе упрочнения сплавов за счет варьирования их химсостава и подбора видов термообработки. В этом случае тенденция понижения резервов прочности ( $B_r$  и  $K_{ms}$ ) с ростом прочности металлических сплавов  $\sigma_{0,2}$  существенно ниже, чем при температурном способе [1, 8], что позволяет сдвинуть начало охрупчивания сплава до более высоких значений  $\sigma_{0,2}$ .

В таблице 2 по данным работы [1] показано, что в интервале прочностей  $\sigma_{0,2}$  от 374 до 1533 МПа показатель  $B_r$  снизился лишь в 2 раза (с 3,38 до 1,67), но критический уровень  $B_{rb}$ , отвечающий максимуму  $\sigma_{NFmax}$ , определенному для каждого сплава при критической температуре  $T_b$  (см. ри-

Таблица 1 — Изменение основных показателей механических свойств сталей 40 и 30ХГСА при их упрочнении в результате снижения температуры испытаний

Сталь	№ п/п	$T_{исп.}$ , К	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{NF}$ , МПа	$S_K$ , МПа	$B_r(B_{rb})$	$P_{me}$
Ст. 40 (Н) $R_{MC} = 1362$ МПа	1	293	530	1145	1155	2,18	1,16
	2	179	646	1323	1350	2,09	1,12
	3	161	730*	1374*	1366	1,87*	1,0
	4	146	781	1338	1405	1,80	0,96
	5	133	870	1150	1455	1,67	0,89
	6	104	969	890	1532	1,58	0,85
	7	96	1005	843	1560	1,55	0,83
30ХГСА (ОП 520 °С, 1 ч) $R_{MC} = 2015$ МПа	8	293	970	2010	1850	1,90	1,19
	9	235	1040	2053	1835	1,76	1,11
	10	185	1111	2132	1860	1,67	1,05
	11	153	1165	2185	1900	1,63	1,03
	12	126	1230*	2246*	1950	1,59*	1,0
	13	94	1308	2220	2020	1,54	0,97
	14	77	1332	2137	2055	1,54	0,97

Примечания: \* — критические показатели свойств сталей ( $\sigma_{0,2b}$ ,  $B_{rb}$ ,  $\sigma_{NFmax}$ ), предельно допустимые для образцов с КН по признаку максимальной несущей способности  $\sigma_{NFmax}$ ;  $R_{MC}$  — характеристика хрупкой прочности (сопротивление микросколу) [6]; Н — нормализация; ОП — отпуск.

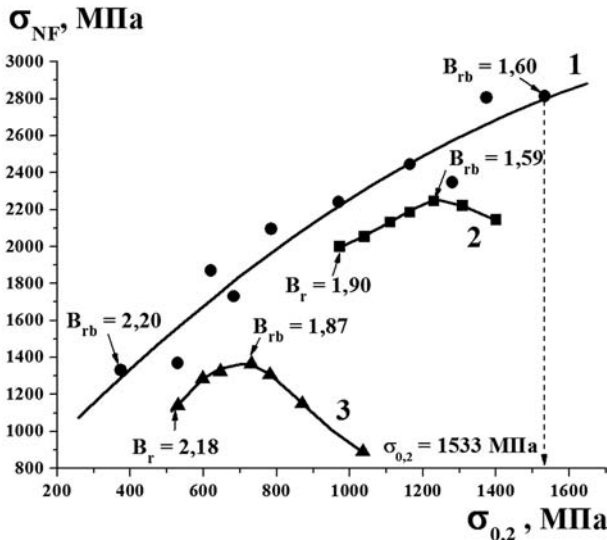


Рисунок 2 — Закономерности влияния прочности стали  $\sigma_{0,2}$  на уровень несущей способности  $\sigma_{NF}$  образцов с КН под воздействием: 1 — структурного фактора; 2, 3 — температурного фактора (см. таблицу 1); экспериментальные данные [1]: ● — (№№ 1–9 в таблице 2); ▲ — сталь 40 (№№ 1–7 в таблице 1); ■ — сталь 30ХГСА (№№ 8–14 в табл. 1); изломостойкость:  $B_r$  — исходная при 293 К;  $B_{rb}$  — критическая при  $T_b$

сунок 1), снизился в еще меньшей мере — с 2,20 до 1,60 (см. рисунок 2).

Соотношение между  $B_r$  и  $B_{rb}$  характеризует имеющийся запас деформационной стойкости металла для данного ЭК в виде параметра  $P_{me}$ :

$$P_{me} = B_r / B_{rb}. \quad (3)$$

Критерий силовой надежности изделия с концентратором напряжений, которому грозит потеря несущей способности  $\sigma_{NF}$  из-за пагубного проявления резкой неоднородности пластической деформации в зоне КН, имеет вид:

$$P_{me} \geq 1, \quad (4)$$

что свидетельствует о полноценной силовой пригодности данного материала для данного изделия, поскольку неизбежные конструктивные неоднородности НДС (в зоне резьбовых соединений, на-

пример) не будут представлять опасности с точки зрения проявления охрупчивания изделия в виде снижения несущей способности  $\sigma_{NF}$

Представим параметр  $P_{me}$  в развернутом виде:

$$P_{me} = \frac{S_K / \sigma_{0,2}}{S_{Kb} / \sigma_{0,2b}} = \frac{S_K \cdot \sigma_{0,2b}}{S_{Kb} \cdot \sigma_{0,2}}. \quad (5)$$

Напомним, что индекс «b» относится к свойствам сплава, для которого ЭК с концентратором имеет наибольшую несущую способность  $\sigma_{NFmax}$  (см. рисунок 1), поэтому для сохранения  $P_{me}$  по (5) постоянным с ростом исходной прочности сплава  $\sigma_{0,2}$  должен соблюдаться баланс соотношений  $\sigma_{0,2b} / \sigma_{0,2}$  и  $S_K / S_{Kb}$ . При температурном способе роста прочности  $\sigma_{0,2}$  имеет место  $\sigma_{0,2b} / \sigma_{0,2} > 1$  и  $S_K / S_{Kb} < 1$  (см. рисунок 1), вследствие чего параметр конструкционной пригодности  $P_{me}$  снижается и при температуре начала охрупчивания  $T_b$  равняется единице, что ограничивает пригодность

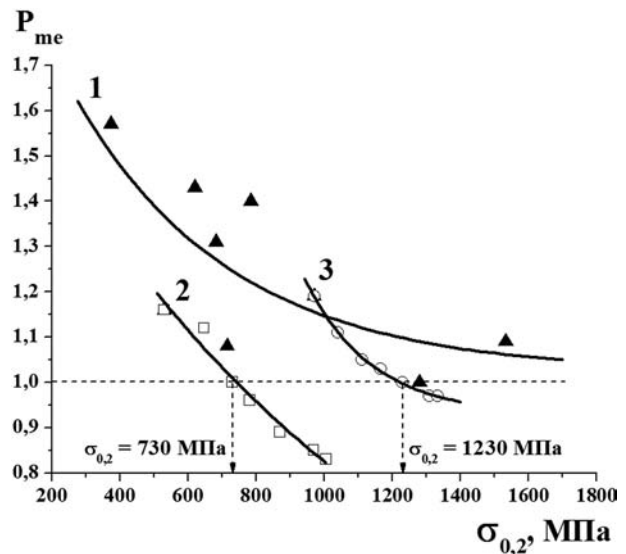


Рисунок 3 — Зависимости запаса деформационной стойкости (изломостойкости) металла  $P_{me}$  от прочности  $\sigma_{0,2}$  сталей: 1 — при структурном повышении прочности — по данным таблицы 2 (▲); при температурном повышении прочности: 2 — сталь 40 (№№ 1–7 в таблице 1) (□); 3 — сталь 30ХГСА (№№ 8–14 в таблице 1) (○)

Таблица 2 — Показатели базовых и резервных механических свойств сталей по данным работы [1]

№ п/п	Сталь, обработка	$\sigma_{0,2}$ , МПа (293 К)	$S_K$ , МПа (293 К)	$T_b$ , К	$\sigma_{0,2b}$ , МПа ( $T_b$ )	$S_{Kb}$ , МПа ( $T_b$ )	$B_r$ (1)	$B_{rb}$	$\sigma_{NF}$ , МПа	$P_{me}$ (3)
1	ст. 40, ОЖ	374	1265	139	656	1440	3,38	2,20	1087	1,57
2	ст. 40, Н	530	1155	160	730	1310	2,18	1,87	1145	1,16
3	ст. 40, 3 + ОП 560 °С, 1 ч	620	1621	133	950	1760	2,61	1,85	1722	1,43
4	ст. 40, 3 + ОП 400 °С, 1 ч	683	1620	134	1012	1832	2,37	1,81	1572	1,31
5	30ХГСА, Н	715	1650	178	807	1726	2,31	2,14	1340	1,08
6	ст. 40, 3 + ОП 380 °С, 1 ч	785	1848	130	1153	1941	2,35	1,68	1927	1,40
7	30ХГСА, 3 + ОП 520 °С, 1 ч	970	1850	128	1230	1955	1,91	1,59	2010	1,19
8	30ХГСА, 3 + ОП 400 °С, 1 ч	1280	2170	190	1345	2288	1,70	1,70	2199	1,0
9	30ХГСА, 3 + ОП 300 °С, 0,5 ч	1533	2559	193	1602	2560	1,67	1,60	2903	1,09

Примечания: ОЖ — отжиг 880 °С; Н — нормализация 880 °С; 3 — закалка 880 °С.

стали 40 для изделия с данным КН на критическом уровне прочности  $\sigma_{0,2} = 730$  МПа, а пригодность стали 30ХГСА — на критическом уровне  $\sigma_{0,2} = 1230$  МПа (см. рисунок 3, таблицу 1).

Таким образом, по зависимостям изломостойкости металла  $P_{me}$  от прочности  $\sigma_{0,2}$  при ее температурном повышении (см. рисунок 3) можно определить температурный интервал конструкционной пригодности данного материала для данного вида изделия по критерию ( $P_{me} > 1$ ). Например, для исследованной стали 40 (см. рисунок 3, кривая 2; №№ 1–7 в таблице 1) он составит  $161 \text{ K} < T \leq 293 \text{ K}$ , а для стали 30ХГСА (см. рисунок 3, кривая 3; №№ 8–14 в таблице 1) —  $126 \text{ K} < T \leq 293 \text{ K}$ .

Но при структурном подходе к повышению прочности сплава имеют место иные закономерности изменения указанных в (5) соотношений показателей прочности, поэтому прочностной порог конструкционной пригодности сплава для данного КН можно поднять вплоть до уровня  $\sigma_{0,2} = 1533$  МПа, а несущую способность  $\sigma_{NF}$  — до 2903 МПа (см. рисунок 2, № 9 в таблице 2).

Таким образом, можно приблизиться к установлению порога действительно предельно возможного рационального упрочнения стали применительно к условиям НДС данного изделия (рисунок 4).

Запрет на дальнейшее повышение прочности стали вытекает из критерия (4), если уровень показателя деформационной стойкости  $B_r$  станет ниже критического значения  $B_{rb}$  по (3) и, следовательно, при уровне  $P_{me} < 1$  дальнейшее повышение прочности стали для данного изделия теряет смысл.

Порогом рационального упрочнения стали является очевидное условие:

$$P_{me} = 1. \quad (6)$$

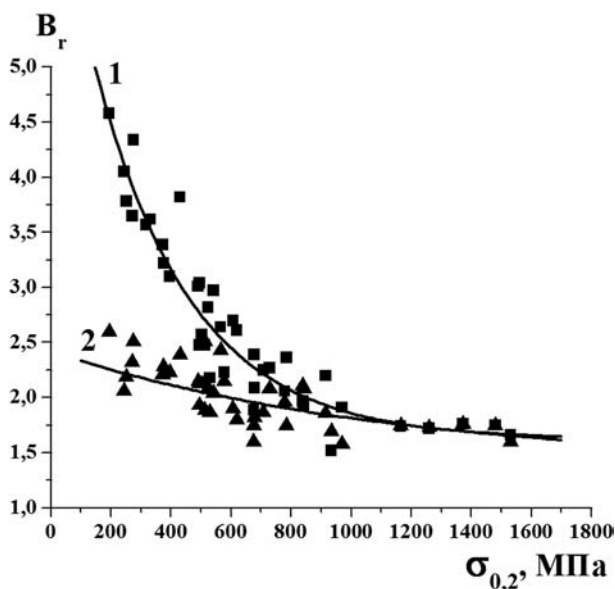


Рисунок 4 — Связь деформационной стойкости  $B_r$  и  $B_{rb}$  с прочностью конструкционных сталей  $\sigma_{0,2}$  по данным работ [1, 10]: 1 — исходная изломостойкость  $B_r$  при 293 К (■); 2 — критическая изломостойкость  $B_{rb}$  при  $T_b$  (▲)

Выявление максимально возможного порога прочности при подборе наилучшего металла для данного изделия избавит технологов от бесполезных усилий в поиске дальнейших мер по увеличению прочности данных изделий в рамках существующих технологий, т. к. все такие попытки приведут лишь к падению несущей способности изделия ( $\sigma_{NF}$ ), несмотря на увеличение уровня прочности  $\sigma_{0,2}$  металла.

Тенденцию приближения к такому порогу упрочнения стали для образцов с кольцевым надрезом по данным работ [1, 2] можно проследить на рисунке 2, где изображены зависимости несущей способности образцов с надрезом  $\sigma_{NF}$  от уровня прочности металла  $\sigma_{0,2}$ . Предельная несущая способность на данном виде образцов ( $\sigma_{NFpred.} \approx 2800$  МПа) достигается при прочности стали 30ХГСА (3 + ОП 300 °С)  $\sigma_{0,2} \approx 1533$  МПа, у которой изломостойкость  $B_r$  приближается к критическому значению  $B_{rb} \approx 1,6$ . Видимо, при этом достигается предел рационального упрочнения стали при структурном повышении прочности  $\sigma_{0,2}$  применительно к данному виду изделия при  $B_{rb} \rightarrow B_r$  (см. рисунок 4, таблицу 2). Подобный критерий может оказаться актуальным, например, при решении задач достижения максимальной прочности сильнонагруженных резьбовых соединений в изделиях из высокопрочных конструкционных сплавов.

**Заключение.** Фундаментальной причиной охрупчивающего действия КН в металлических элементах конструкций являются неоднородные силовые поля, в которых происходит локальное истощение ресурса пластичности металла. Поэтому в испытаниях образцов с нанесенными надрезами для оценки склонности металла к охрупчиванию широко используются прямые показатели свойств надрезанных образцов (ударная вязкость, остаточная пластичность  $\psi_N$ , несущая способность  $\sigma_{NF}$ ), которые лишь фиксируют эффект потери пластичности металла, но не дают меры приближения к порогу недопустимой стадии охрупчивания.

В настоящей работе указанная трудность преодолевается путем переноса критической стадии охрупчивания ( $\sigma_{NFmax}$ ) на шкалу свойств самого металла.

Образцы с надрезом служат удобной моделью для испытаний на деформационную устойчивость металлов против охрупчивающего действия фактора неоднородностей НДС. Силовая надежность нагруженных элементов конструкций базируется на резерве свойства деформационной стойкости (изломостойкости)  $B_r$ , сочетающего в себе свойства пластичности и деформационного упрочнения металла.

Критерий критического уровня изломостойкости  $B_{rb}$  для образцов с кольцевым надрезом привязан к условию максимума несущей способности этих образцов  $\sigma_{NFmax}$  на шкале увеличения прочно-

сти металла  $\sigma_{0,2}$ . Таким образом, превышение фактического уровня изломостойкости  $B_r$  над критическим  $B_{rb}$  обозначает меру конструкционной пригодности металла для *данного* изделия в виде параметра  $P_{me} = B_r / B_{rb}$ . Условие  $P_{me} > 1$  означает, что в изделии, в котором возможен штатный или непредусмотренный источник неоднородного НДС (например, конструктивный КН) между прочностью металла  $\sigma_{0,2}$  и конструкционной прочностью  $\sigma_{NF}$  имеет место монотонная зависимость, т. е. изделию не грозит опасность преждевременного охрупчивания. В связи с этим актуальной инженерной задачей становится проблема связи параметра  $B_r$  для образцов с надрезом с аналогичным параметром  $B_{rb}$  данного конкретного изделия. Это задача последующих исследований.

#### Список условных обозначений:

КН — концентратор напряжений; ЭК — элемент конструкции; НДС — напряженно-деформированное состояние; Н — нормализация; ОП — отпуск; ОЖ — отжиг; З — закалка.

#### Список литературы

1. Мешков, Ю.Я. Пределы рационального упрочнения конструкционных сталей / Ю.Я. Мешков, А.В. Шиян,

- В.Н. Грищенко // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. / ПГАСА; под общ. ред. В.И. Большакова. — Днепропетровск, 2016. — Вып. 89. — С. 112–118.
2. Влияние прочности на охрупчиваемость сталей под действием концентраторов напряжений / Грищенко В.Н. [и др.] // Металлофизика и новейшие технологии. — 2015. — Т. 37, № 7. — С. 961–971.
3. Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов / Я.Б. Фридман. — М.: Машиностроение, 1974. — 472 с.
4. Hollomon, J.H. Tensile deformation / J.H. Hollomon // Trans. AIME. Iron Steel Div. — 1945. — Vol. 162. — Pp. 268–290.
5. Когаев, В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. — М.: Машиностроение, 1985. — 223 с.
6. Котречко, С.А. Предельная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции / С.А. Котречко, Ю.Я. Мешков. — Киев: Наук. думка, 2008. — 295 с.
7. Котречко, С.А. Механическая стабильность — универсальная мера сопротивления переходу в хрупкое состояние металла / С.А. Котречко, Ю.Я. Мешков, А.В. Шиян // Успехи физики металлов. — 2009. — Т. 10, № 2. — С. 207–228.
8. Мешков, Ю.Я. Механическая стабильность металлов и сплавов / Ю.Я. Мешков, С.А. Котречко, А.В. Шиян. — Киев: Наук. думка, 2014. — 278 с.
9. Савин, Г.Н. Справочник по концентрации напряжений / Г.Н. Савин, В.И. Тульчий. — Киев: Высш. шк., 1976. — 412 с.
10. Шиян, А.В. Охрупчивание металлических сплавов в условиях концентрации напряжений. Конструкционные стали и титановые сплавы / А.В. Шиян, Ю.Я. Мешков. — Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. — 113 с.

MESHKOV Yuriy Ya., Corresponding member of NAS of Ukraine, D. Sc. in Eng.

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

E-mail: meshkov100@gmail.com

SHIYAN Artur V., D. Sc. in Eng.

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

E-mail: shyian\_av@ukr.net

<sup>1</sup>Kurdyumov Institute of Metal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

Received 17 January 2017.

## ON INTERACTION BETWEEN MATERIAL STRENGTH AND THE STRENGTH OF STRUCTURAL ELEMENTS

*Based on the analysis of previously obtained experimental data, the authors of the article developed a new methodology for the assessment of structural steels ability to resist embrittling effect of stress concentrators (SC), which manifests itself in the form of loss of the bearing capacity  $\sigma_{NF}$  samples with an annular notch. The concept of a reserve of metal strength (break resistance  $B_r$ ), performs the function of “clearing” local peak surges in SC zone, blocking a possible reduction in the strength of the product. The critical values of break resistance  $B_{rb} \approx 1,6 \dots 2,2$  on specimens with notch for steels with different levels of strength in the range  $\sigma_{0,2} \approx 300 \dots 1500$  MPa. It is proposed to use the concept of structural alloy suitability for products containing SC with a known exponent  $B_{rb}$ . The criterion of suitability is the structural condition of  $B_r \geq B_{rb}$ . A characteristic feature of the alloy structural suitability for products with the SC is a monotonic increase in the structural strength of the product ( $\sigma_{NF}$ ) with increasing strength of the metal  $\sigma_{0,2}$ , indicating the absence of the threat of embrittlement of the products available from the SC.*

**Keywords:** deformation endurance, break resistance, load-bearing capacity, stress concentration, structural suitability

## References

1. Meshkov Yu.Ya., Shiyan A.V., Grischenko V.N. Predely ratsionalnogo uprochneniya konstruktsionnykh staley [The limits of rational hardening of structural steels]. *Trudy "Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroeniye"* [Proc. of the Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture "Construction, materials science, mechanical engineering"], 2016. no. 89, pp. 112–118.
2. Grischenko V.N., Meshkov Yu.Ya., Polushkin Yu.A., Shiyan A.V. Vliyaniye prochnosti na ohrupchivaemost staley pod deystviem kontsentratorov napryazheniy [Impact strength steels ohrupchivaemost stress raisers under the action]. *Metalofizika i noveyshie tehnologii* [Metal Physics and Advanced Technology], 2015. vol. 37, no 7. pp. 961–971.
3. Fridman Ya.B. *Mekhanicheskie svoystva metalov* [Mechanical properties of metals]. Moscow, Mashinostroeniye, 1974. 472 p.
4. Hollomon J.H. Tensile deformation. *Trans. AIME. Iron Steel Div.*, 1945. vol. 162, pp. 268–290.
5. Kogaev V.P., Mahutov N.A., Gusenkov A.P. *Raschety detaley mashyn i konstruktivnykh na prochnost i dolgovechnost* [The calculations of machine parts and structures for strength and durability]. Moscow, Mashinostroeniye, 1985. 223 p.
6. Kotrechko S.A., Meshkov Yu.Ya. *Predelnaya prochnost. Kristally, metally, konstruktivnyye* [Maximum strength. Crystals, metals, constructions]. Kiev, Naykova Dumka, 2008. 295 p.
7. Kotrechko S.A., Meshkov Yu.Ya., Shiyan A.V. Mekhanicheskaya stabilnost — universalnaya mera soprotivleniya perehodu v hrupkoe sostoyaniye metala [Mechanical stability — the universal measure of the resistance in the transition metal fragile state]. *Uspehy fiziki metalov* [The success of Metal Physics], 2009, vol. 10, no. 2, pp. 207–228.
8. Meshkov Yu.Ya., Kotrechko S.A., Shiyan A.V. *Mekhanicheskaya stabilnost metallov i splavov* [The mechanical stability of metals and alloys]. Kiev, Naykova Dumka, 2014. 278 p.
9. Savin G.N., Tulchiy V.I. *Spravochnik po kontsentratsii napryazheniy* [Directory of stress concentration]. Kiev, Vysshaya shkola, 1976. 412 p.
10. Shiyan A.V., Meshkov Yu.Ya. *Ohrupchivaniye metalicheskikh splavov v usloviyakh kontsentratsii napryazheniy. Konstruktivnyye stali i titanovye splavy* [Embrittlement of metal alloys in the conditions of stress concentration. Structural steel and titanium alloys]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 113 p.