

УДК 669.017:539.4; 538.951-405

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРИГОДНОСТЬ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

МЕШКОВ Ю.Я., *чл.-корр. НАН Украины, д.т.н., профессор,*
ШИЯН А.В., *д.т.н.*

Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, бульвар Вернадского, 36, 02142, Киев, Украина, тел. +38 (044) 452-13-52

Аннотация. *Цель.* Задачей данной работы было обосновать целесообразность использования понятия конструкционной пригодности металла для конкретного изделия на принципе достижения его максимальной конструкционной прочности (несущей способности) за счет рационального сочетания базового комплекса механических свойств. *Методика.* Анализ ранее полученных авторами работы экспериментальных данных по исследованию закономерностей связи показателей несущей способности образцов с надрезом σ_{NF} с базовыми механическими характеристиками сталей разного уровня прочности $\sigma_{0.2}$. *Результаты.* Установлено, что главным признаком конструкционной пригодности сплава для данного изделия, несущего определенную силовую нагрузку σ_{NF} , служит адекватная сопротивляемость сплава пагубному действию неоднородных силовых полей (концентраторов напряжений), способных привести к преждевременному разрушению изделия, защитой от которого служит специальное свойство металла – деформационная стойкость $B_r = S_k/\sigma_{0.2}$. Показано, что оптимальная конструкционная пригодность достигается для сплава с критическим значением B_{rb} , отвечающем максимально возможной для данного изделия несущей способностью σ_{NFmax} . *Научная новизна.* Впервые в материаловедении предлагается количественно измеряемый параметр P_{me} , обозначающий меру запаса допустимой (безопасной) силовой перегрузки изделия с неоднородным характером распределения деформаций по рабочему сечению вблизи концентратора напряжений. *Практическая значимость.* Традиционный инженерный расчет допустимых нагрузок при проектировании изделий может быть дополнен предварительным расчетом основных показателей механических свойств металла, что исключает возможность реализации хрупкого вида разрушения с потерей прочности изделия в случае экстремальной его перегрузки при эксплуатации.

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

МЕХАНИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА КОНСТРУКЦІЙНА ПРИДАТНІСТЬ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

МЕШКОВ Ю.Я., *чл.-кор. НАН України, д.т.н., професор,*
ШИЯН А.В., *д.т.н.*

Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, бульвар Вернадського, 36, 02142, Київ, Україна, тел. +38 (044) 452-13-52

Анотація. *Ціль.* Завданням даної роботи було обґрунтувати доцільність використання поняття конструкційної придатності металу для конкретного виробу на принципі досягнення його максимальної конструкційної міцності (несучої здатності) за рахунок раціонального поєднання базового комплексу механічних властивостей. *Методика.* Аналіз раніше отриманих авторами роботи експериментальних даних по дослідженню закономірностей зв'язку показників несучої здатності зразків з надрізом σ_{NF} з базовими механічними характеристиками сталей різного рівня міцності $\sigma_{0.2}$. *Результати.* Встановлено, що головною ознакою конструкційної придатності сплаву для даного виробу, що несе певне силове навантаження σ_{NF} , слугує адекватна опірність сплаву згубній дії неоднорідних силових полів (концентраторів напружень), здатних привести до передчасного руйнування виробу, захистом від якого слугує спеціальна властивість металу – деформаційна стійкість $B_r = S_k/\sigma_{0.2}$. Показано, що оптимальна конструкційна придатність досягається для сплаву з критичним значенням B_{rb} , що відповідає максимально можливий для даного виробу несучій здатності σ_{NFmax} . *Наукова новизна.* Вперше в матеріалознавстві пропонується кількісно вимірюваний параметр P_{me} , що позначає міру запаса допустимого (безпечного) силового перевантаження виробу з неоднорідним характером розподілу деформацій по робочому перерізу поблизу концентратора напружень. *Практична значимість.* Традиційний інженерний розрахунок допустимих навантажень при проектуванні виробів може бути доповнений попереднім розрахунком основних показників механічних властивостей металу, що виключає можливість реалізації крихкого вигляду руйнування з втратою міцності виробу в разі його екстремального перевантаження при експлуатації.

Ключові слова: деформаційна стійкість, зламостійкість, несуча здатність, концентрація напружень, конструкційна придатність.

MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURAL APPLICATIONS OF METALS AND ALLOYS

MESHKOV Yu.Ya., *Dr. of Tech. Sci., Corresponding Member of NAS of the Ukraine*,
SHIYAN A.V., *Dr. of Tech. Sci.*

G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of NAS of the Ukraine, 36, Vernadsky av., 02142, Kyiv, Ukraine, phone: +38 (044) 452-13-52

Abstract. Purpose. The aim of this study was to prove the feasibility of using the metal structural suitability of the concept for a specific product on the principle of achieving its maximum structural strength (bearing capacity) due to the rational combination of the base of the complex mechanical properties. **Methodology.** An analysis of previously obtained by the authors of the experimental data on the study of patterns of connection parameters carrying capacity of notched σ_{NF} with basic mechanical properties of steels of different strength level $\sigma_{0.2}$. **Findings.** It was established that the main feature of the structural suitability of the alloy for the product bearing a certain power load σ_{NF} , provides adequate resistance alloy harmful effects of nonuniform force fields (stress concentrators) that can lead to premature failure of the product, which is protected by special metal property – deformation resistance $B_r = S_K/\sigma_{0.2}$. It is shown that the optimal structural suitability of the alloy is achieved with the critical value B_{rb} , corresponding to the maximum possible for the product bearing capacity σ_{NFmax} . **Originality.** For the first time in materials offered quantifiable parameter P_{me} , indicating the extent of the permissible margin (secure) power overload products with non-uniform strain distribution on the nature of the working cross-section near the stress concentrator. **Practical value.** The traditional engineering calculation of permissible loads in the design of products can be supplemented by a preliminary calculation of the main indicators of the mechanical properties of the metal, which excludes the possibility of realizing a fragile type of failure with loss of strength of the product in case of extreme overload during operation.

Keywords: deformation resistance, breakresistance, load-bearing capacity, stress concentration, structural suitability.

Введение

В комплексе механических свойств, необходимых для успешной эксплуатации сильно нагруженных металлических изделий и сооружений, кроме основного, базового свойства – прочности, имеются требования к ряду свойств, обеспечивающих силовую надежность изделия – пластичность, вязкость, трещиностойкость и др. Оптимальное сочетание показателей всех необходимых свойств должно выявить полноценную конструкционную пригодность материала для проектируемого изделия, что исключало бы возможность его мгновенного катастрофического разлома в рамках расчетно допустимой перегрузки в условиях экстремального силового воздействия. Для этого важно, чтобы расчету подлежала не только штатная (безопасная) рабочая нагрузка, но и безопасно допустимая экстремальная перегрузка изделия.

Наглядное представление об обобщенном свойстве конструкционной пригодности материала дает сравнение поведения при испытаниях на изгиб стеклянного и металлического стержней, где неоднородность напряженно-деформированного состояния (НДС) легко провоцирует ломкость стекла и “гасится” пластичностью металла, не допускающей преждевременного разрушения.

Способность металла сопротивляться разрушительному действию неоднородных силовых полей, например, в зонах концентрации напряжений, является именно тем свойством, которое отвечает за возможность его успешного конструкционного применения. В реальных изделиях и элементах конструкций (ЭК) степень неоднородности НДС

может весьма сильно различаться, поэтому образцы с концентраторами напряжений (КН) можно использовать в качестве удобных моделей ЭК, для которых возможны несложные расчетные процедуры для количественной оценки требуемых параметров конструкционной пригодности материалов. В работе [1] для предоставления свойства конструкционной пригодности металла в качестве исходного показателя была использована характеристика B_r :

$$B_r = S_K/\sigma_{0.2}, \quad (1)$$

названная в [1] деформационной стойкостью (или изломостойкостью (breakresistance)), где S_K – истинное напряжение разрушения образца в “шейке” при растяжении, $\sigma_{0.2}$ – условный предел текучести. Величина B_r в безразмерной форме отражает резерв сопротивления разрушению в условиях деформационного упрочнения пластически деформируемого металла при одноосном растяжении. Несущественной трехосностью напряжений в “шейке” в первом приближении можно пренебречь, т.к. согласно [2] коэффициент отличия в величинах S_K и σ_{11} для “шейки” средних размеров ($\psi_K \approx 40...50\%$) не превышает $B \leq 1,10...1,15$.

Несмотря на отмеченную приближенность в определении параметра B_r , его применение весьма удобно в качестве инструмента для экспрессной оценки важнейшего механического свойства сталей и сплавов, получаемого в результате проведения простейших испытаний на растяжение. Свойство деформационной стойкости B_r отражает именно тот резерв локальной деформационной выносливости металла в зоне местной пластической деформации, где на крайнем волокне у самого кончика концентратора (надреза, трещины, резьбы и т.п.) реализуется

наибольшая местная пластическая деформация, для которой локальный критерий начала разрушения должен быть близким к величине S_K .

Поэтому главная ценность показателя B_r проявляется в том, что он отвечает за силовое условие реализации локального разрушения в месте концентрации напряжений на кончике надреза, т.е. отвечает за несущую способность нагруженного ЭК, содержащего КН, иными словами отвечает за конструкционную прочность изделия с КН.

Цель

Задачей настоящей работы является анализ и обобщение закономерностей влияния комплекса основных показателей прочностных свойств конструкционных сталей ($\sigma_{0,2}$, S_K , B_r) на несущую способность (σ_{NF}) модельных образцов ЭК с КН в испытаниях на растяжение образцов с кольцевыми надрезами по данным ряда предыдущих работ авторов настоящей статьи [1, 3, 4].

Материалы и методика исследований

В настоящем разделе анализируются особенности проявления негативного влияния неоднородных силовых полей на несущую способность σ_{NF} (номинальное напряжение разрушения образца с надрезом) для сталей 40 и 30ХГСА по данным ранее выполненных работ авторов, представленных в статьях [3, 4].

Как известно, негативная роль КН в виде резкого снижения прочности образцов с надрезом сильнее всего проявляется на хрупких материалах, тогда как на пластичных металлах из-за деформационного упрочнения и стеснения деформации в зоне надреза σ_{NF} не только превышает предел текучести $\sigma_{0,2}$, но может достигать и даже превышать уровень S_K гладкого образца, т.е. надрез может обладать даже упрочняющим эффектом (рис.1).

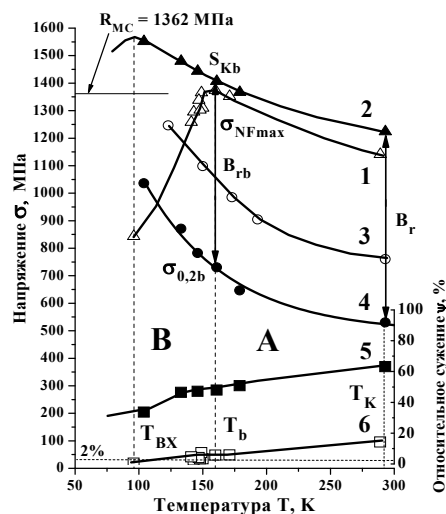


Рис. 1. Температурные зависимости стали 40 (нормализация 880 °C) по результатам испытаний гладких образцов и образцов с КН [3]:
 1 – среднего номинального напряжения разрушения

σ_{NF} образца с КН; 2 – истинного напряжения в момент разрушения гладкого образца S_K ; 3 – напряжение общей текучести σ_{GY} ; 4 – условного предела текучести $\sigma_{0,2}$; 5 – относительного сужения в момент разрушения гладкого образца ψ_K ; 6 – то же для образца с КН ψ_N ; экспериментальные данные: темные знаки – без КН; светлые знаки – под действием КН; R_{MC} – хрупкая прочность стали; температуры: T_K – комнатная (293 К), T_{BX} – вязко-хрупкого перехода, T_b – критическая в момент начала охрупчивания; критические прочностные при T_b : σ_{NFmax} – максимальное значение несущей способности образца с надрезом, $\sigma_{0,2b}$ – условный предел текучести, S_{Kb} – истинное напряжение в момент разрушения гладкого образца; изломостойкости: B_r – исходная при 293 К, B_{rb} – критическая при T_b ; температурные зоны механического поведения образцов: А (от T_K до T_b), В ($T < T_b$) / Temperature dependence of steel 40 (normalization of 880 ° C) according to the results of tests of smooth specimens and specimens with SC [3]: 1 – average nominal voltage failure σ_{NF} sample with SC; 2 – true stress fracture point smooth sample S_F ; 3 – stress total turnover σ_{GY} ; 4 – proof stress $\sigma_{0,2}$; 5 – percentage reduction in fracture point smooth sample ψ_F ; 6 – the same sample with SC ψ_N ; test data: dark marks - without SC; bright signs - under the influence of SC; R_{MC} – steel brittle strength; temperature: T_F – apartment (293 K), T_{DB} – ductile-brittle transition, T_b – critical at the start of embrittlement; critical strength at T_b : σ_{NFmax} – maximum load capacity notched, $\sigma_{0,2b}$ – proof stress, S_{Fb} – true stress fracture point smooth sample; breakresistances: B_r – starting at 293 K, B_{rb} – critical when T_b ; temperature zones of the mechanical behavior of samples: А (from T_K before T_b), В ($T < T_b$)

На рис. 1 представлена сложная картина изменения комплекса механических свойств металла при снижении температуры испытаний гладких и надрезанных образцов из стали 40. Видно, что монотонное повышение прочности $\sigma_{0,2}$ стали при снижении температуры сопровождается монотонным снижением показателей пластичности ψ_K и ψ_N (ψ_K – сужение в “шейке” при разрыве гладкого образца, ψ_N – то же в месте надреза для образца с надрезом). Но для силовых показателей разрушения монотонность зависимостей нарушается, обнаруживая максимум S_K (при температуре вязко-хрупкого перехода T_{BX} и для σ_{NF} при $T_b > T_{BX}$). Как видим, охрупчивающая роль надреза по снижению пластичности ($\psi_N \ll \psi_K$) проявляется немедленно уже при комнатной температуре T_K , тогда как по несущей способности σ_{NF} охрупчивание образца с надрезом отмечается лишь ниже критической температуры $T_b \ll T_K$, где наблюдается максимум σ_{NFmax} . Поскольку для нагруженного элемента конструкции главным признаком конструкционной пригодности служит реальная несущая способность ЭК, а не результат последствий разрушения в виде величины ψ_N , то на рис.1 следует различать две принципиально разные

температурные зоны механического поведения образцов с надрезом: зона *A* (от T_K до T_b), где рост прочности стали $\sigma_{0,2}$ сопровождается монотонным ростом конструкционной прочности σ_{NF} образца, моделирующего ЭК, и зона *B* ($T < T_b$), где росту $\sigma_{0,2}$ соответствует падение σ_{NF} .

Хотя показатель деформационной стойкости B_r не обнаруживает какой-либо особенности при критической температуре T_b (в точке максимума σ_{NFmax}), тем не менее текущее значение B_{rb} , зафиксированное при $T = T_b$, приобретает смысл критического параметра деформационной стойкости металла, соответствующего начальной стадии охрупчивания образца с данным видом КН. Следует подчеркнуть, что признаком охрупчивания в данном случае является момент начала *потери прочности* надрезанного образца σ_{NF} , но не потери пластичности ψ_N или появление кристалличности во фактуре излома образца. Такой критерий охрупчивания металла фактором неоднородности НДС можно считать более актуальным для инженерного применения в задачах защиты целостности ЭК, чем определение доли кристалличности в изломе.

Результаты

В работе [3] было установлено, что при увеличении уровня прочности стали ($\sigma_{0,2}$) величина критического значения параметра B_{rb} понижается (табл.1), но темп этого снижения зависит от способа увеличения прочности. При температурном возрастании прочности (путем снижения температуры) ресурс безопасного интервала деформационной стойкости ($B_r > B_{rb}$) исчерпывается довольно быстро, после чего прочность σ_{NF} изделия с КН начинает падать (рис.2, кривые 2 и 3).

Но при структурном способе повышения прочности, когда увеличение уровня прочности стали $\sigma_{0,2}$ связано с изменением состава или структуры стали, то интервал докритического изменения параметра деформационной стойкости $B_r \geq B_{rb}$ значительно расширяется (рис.2, кривая 1) и механическое охрупчивание стали удается задержать до гораздо более высоких уровней прочности $\sigma_{0,2}$ (табл.1). Из рис.2 вытекает полезный вывод о том, что основной смысл понятия конструкционной пригодности металла для данного изделия сводится к выполнению простого условия – рост *прочности металла* $\sigma_{0,2}$ должен вести к росту *конструкционной прочности изделия* σ_{NF} . При этом для каждого вида изделия, наделенного определенным источником неоднородных силовых полей или КН, имеет место свой критический показатель B_{rb} , которому соответствует максимальный уровень несущей способности изделия σ_{NF} при критическом уровне прочности металла $\sigma_{0,2b}$ (рис.1, 2).

Критическое значение параметра B_{rb} является оптимальным показателем свойства деформационной стойкости металла, предназначенного для данного изделия, поскольку обеспечивает изделию наибольшую возможную несущую способность σ_{NF}

при данном уровне B_r . Для дальнейшего увеличения σ_{NF} потребуется изыскать такие структурные состояния в сталях, используя новые технологические приемы термообработки и т.п., которые при той же прочности $\sigma_{0,2}$ привели бы к повышению параметра B_r , т.е. к возрастанию S_K . Именно в этом заключается сущность оптимизации свойств конструкционной пригодности сплава, реализовать которую можно различными путями.

Таблица 1

Изменение основных показателей механических свойств сталей 40 и 30ХГСА при их упрочнении в результате снижения температуры испытаний [3] / Changing the basic indicators of the mechanical properties of steels 40 and 30KhGSA when hardening by lowering the test temperature [3]

Сталь	№ п/п	$T_{исп.}$, К	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_{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} , σ_{NFmax}), предельно допустимые для образцов с КН по признаку максимальной несущей способности σ_{NFmax} ; R_{MC} – характеристика хрупкой прочности (сопротивление микросколу); Н – нормализация, ОП – отпуск.

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

$$P_{me} = B_r/B_{rb}. \quad (2)$$

Критерий силовой надежности изделия с концентратором напряжений, грозящим потерей несущей способности σ_{NF} из-за пагубного проявления резкой неоднородности пластической деформации в зоне КН, имеет вид:

$$P_{me} \geq 1, \quad (3)$$

что свидетельствует о полноценной силовой пригодности данного материала для данного изделия, поскольку неизбежные конструктивные неоднородности НДС (в зоне резьбовых соединений, например) не будут представлять опасности с точки зрения проявления охрупчивания изделия в виде снижения несущей способности σ_{NF} .

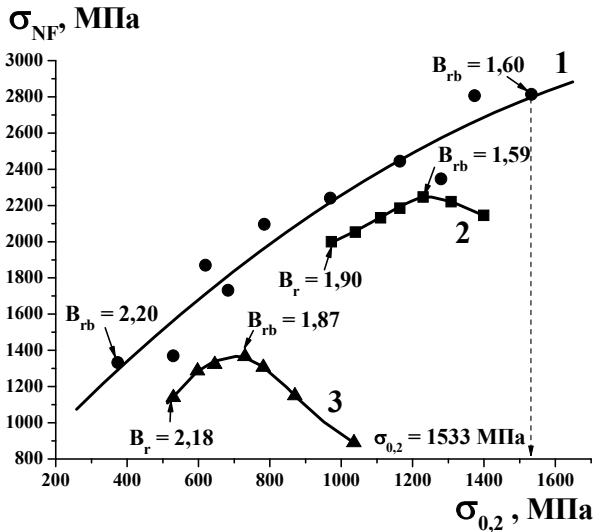


Рис. 2. Закономерности влияния прочности стали $\sigma_{0,2}$ на уровень несущей способности σ_{NF} образцов с КН под воздействием: 1 – структурного фактора; 2, 3 – температурного фактора; экспериментальные данные: ● – данные [1], ▲ – сталь 40 (№№ 1-7 в табл. 1), ■ – сталь 30ХГСА (№№ 8-14 в табл. 1); изломостойкость: B_r – исходная при 293 К; B_{rb} – критическая при T_b / Laws of influence of the strength of steel $\sigma_{0,2}$ the level of bearing capacity σ_{NF} samples SC under the influence: 1 – structural factor; 2, 3 – temperature factor; test data: ● – data [1], ▲ – steel 40 (№№ 1-7 in table 1), ■ – steel 30ХГСА (№№ 8-14 in table 1); breakresistance: B_r – starting at 293 K; B_{rb} – critical when T_b

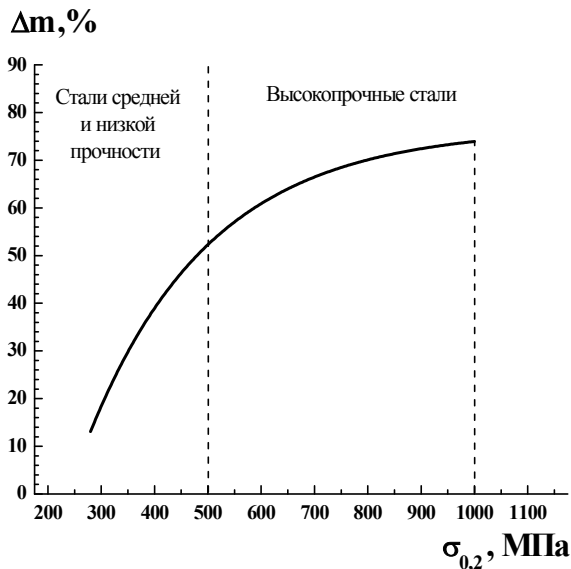


Рис. 3. Зависимость изменения показателя относительного снижения веса конструкции Δm от прочности конструкционной стали $\sigma_{0,2}$ [5] / The dependence of changes in the rate of relative weight reduction design Δm the strength of structural steel $\sigma_{0,2}$

Оптимизация изломостойкости металла для повышения несущей способности изделия.

Снижение металлоемкости тяжело нагруженных изделий и сооружений всегда представляет собой актуальную инженерную задачу, которая обычно означает использование более высокопрочных сплавов. Но с увеличением прочности $\sigma_{0,2}$ практическая эффективность снижения металлоемкости уменьшается [5] (рис.3), что можно объяснить повышенной чувствительностью высокопрочных сталей к неоднородностям НДС и принятием по этой причине более высоких коэффициентов запаса прочности $K_{3П}$. Однако, более рациональным средством повышения силовой отдачи металла в изделии при заданном уровне его прочности $\sigma_{0,2}$ является увеличение резерва деформационной стойкости металла B_r за счет формирования оптимизированного комплекса базовых механических свойств - $\sigma_{0,2}$, σ_b , S_K , Ψ_K , что позволяет прийти к физически обоснованному снижению коэффициента $K_{3П}$.

Основы рационального сочетания базовых свойств заложены в многообразных внутренних связях (взаимозависимостях) отдельных показателей механических свойств друг с другом. В этих связях установлены достаточно четкие закономерности [6, 7], что позволяет целенаправленно регулировать требуемые свойства.

Например, установлено, что между показателями $\sigma_{0,2}$, Ψ_K и K_{ms} (где K_{ms} – характеристика механической стабильности по [6]) имеется связь двух видов – вида 1 и вида 2 [8], знание которых позволяет по двум известным находить наилучший показатель третьего свойства. В этом состоит общий принцип оптимизации свойств, подробно изложенный в монографиях [6, 7], что позволяет целенаправленно регулировать требуемые свойства.

В частности, оказалось, что между характеристиками S_K металла и σ_{NF} образца с надрезом [4] существует прямая связь, обусловленная, вероятно, определенным подобием процессов разрушения в условиях неоднородностей НДС в обоих случаях – в “шейке” и под надрезом. Поэтому средние значения напряжений разрушения S_K и σ_{NF} хорошо коррелируют, хотя локальные величины идеальных напряжений могут сильно отличаться. Несомненно, имеет место некоторое расщепление величин σ_{NF} при постоянном S_K за счет вариации параметра B_r сплавов, но максимальные значения σ_{NFmax} при каждом значении S_K , безусловно, отвечает значению B_{rb} для данного вида надреза. Отсюда понятно, что в решении задачи максимально повысить σ_{NF} для данного вида неоднородности НДС следует в первую очередь обеспечить сплаву наибольший уровень свойства S_K , что выявляется в базовых лабораторных испытаниях, а затем из имеющихся вариантов преимущество имеет сплав с более высоким значением B_r при большем уровне $\sigma_{0,2}$, но наилучшим окажется тот, у которого $B_r \approx B_{rb}$ для данного вида надреза (т.е. вида неоднородности НДС). Для этого, разумеется, необходимо заранее выявить критический параметр B_{rb} по примеру

испытаний, приведенных на рис.1 и 2, принимая во внимание исходный уровень прочности сплава $\sigma_{0,2}$ (рис.4).

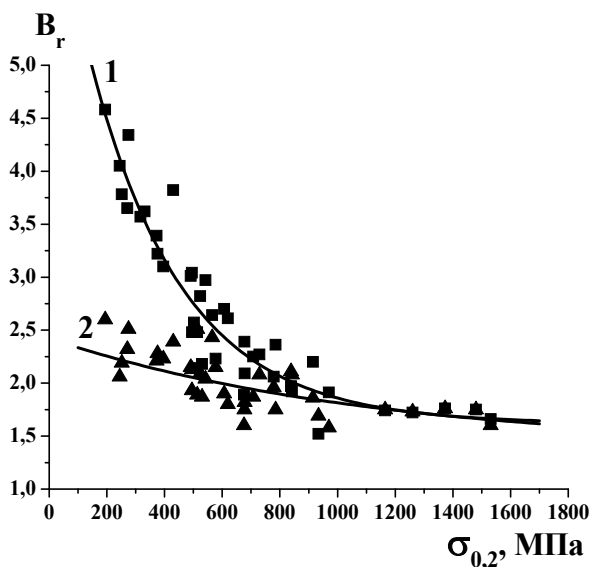


Рис. 4. Связь деформационной стойкости B_r и B_{rb} с прочностью конструкционных сталей $\sigma_{0,2}$ по данным работ [1, 10]: 1 – исходная изломостойкость B_r при 293 К (■), 2 – критическая изломостойкость B_{rb} при T_b (▲) / Contact deformation resistance B_r and B_{rb} with the strength of structural steels according $\sigma_{0,2}$ works [1, 10]: 1 – initial breakresistance B_r at 293 K (■), 2 – critical breakresistance B_{rb} at T_b (▲)

Как видим, оптимальный вариант сплава с наибольшим $\sigma_{NF} = \sigma_{NFmax}$ не обязательно обладает наибольшим значением параметра деформационной стойкости (изломостойкости) B_r , а величиной B_r , хотя и меньшей, но обязательно близкой к критической B_{rb} . Поэтому актуальной становится задача предварительной аттестации на величину B_{rb} тестируемого элемента изделия, содержащего признаки неоднородностей НДС (с учетом уровня прочности сплава $\sigma_{0,2}$, табл.1) и лишь затем осуществляется подбор варианта сплава с наибольшим S_K при $B_r \approx B_{rb}$.

Заключение

В инженерных задачах обеспечения надлежащей конструкционной надежности создаваемых изделий необходимый силовой расчет рабочих сечений, несущих ЭК целесообразно дополнить расчетом комплекса механических характеристик применяемого материала (стали), отвечающего требованиям оптимальной (наибольшей) конструкционной пригодности материала для данного вида изделия (ЭК).

Надлежащую конструкционную пригодность любого материала могут ограничивать две принципиально разные физические причины, заключающиеся в комплексе их механических свойств: хрупкость и охрупчивание. Первая связана с сугубо внутренними для материала причинами – его

структурой и природой, обуславливающими полное отсутствие пластичности. Металлам такое поведение вообще не свойственно по их природе, поэтому к ним применимо лишь понятие «квазихрупкость».

Охрупчивание – это понижение показателей пластичности материала в результате действия внешних факторов – механических (условия НДС, динамика нагружения, температура и т.д.) и возможных субструктурных изменений (старение, облучение и т.п.).

Этим двум неблагоприятным склонностям конструкционных материалов в металлах противодействуют два соответствующих силовых ресурса – против состояния «квазихрупкости» действует свойство механической стабильности (K_{ms}), против механического и иного охрупчивания – свойство деформационной стойкости (B_r). При этом K_{ms} является сугубо прочностным ресурсом, поскольку формируется соотношением двух видов прочностей металла – хрупкой (R_X, R_{MC}) и рабочей, текущей прочности ($\sigma_{0,2}$). Второй B_r – является деформационно обусловленным силовым резервом.

В показателе деформационной стойкости B_r пластичность металла играет двоякую роль – позитивную (релаксационные облегчения от локальных пиковых перегрузок в зонах неоднородных НДС на начальных стадиях локальных перегрузок) и вторую, негативную роль – локализованное исчерпание всегда ограниченного деформационного ресурса с иницированием вначале локального, а затем и глобального, катастрофического разрушения изделия (ЭК). Это явление ломкости (но не хрупкости!) металла. При этом причина неотвратимости глобального катастрофического разрушения от перехода к гриффитсовской нестабильности зародышевой трещины (ЗТ) в зоне локальной пластичности состоит в факте масштабной несоразмерности зоны пластичности (мм или мкм) и области силового проявления действия концентратора от нанотрещины (ЗТ), для которой размер зоны пластичности выглядит как бесконечность.

Поэтому защиту от второго вида угроз для металла (охрупчиваемость) представляет ресурс деформационной стойкости $B_r = S_K/\sigma_{0,2}$, который сохраняет свою эффективность до тех пор, пока $B_r \geq B_{rb}$, т.е. до его совпадения с критическим для данного изделия (НДС, КН) значения B_{rb} . При этом B_{rb} отвечает условию наибольшей (максимальной) несущей способности нагруженного изделия (ЭК). Это означает, что данный металл (B_r) отвечает требованию наилучшей конструкционной пригодности для данного изделия (ЭК).

Степень превышения B_r над B_{rb} показывает меру запаса конструкционной пригодности $P_{me} = B_r/B_{rb}$, что означает для ЭК повышение его силовой надежности, но рациональным с точки зрения снижения металлоемкости изделия является выбор материала с показателем $P_{me} \approx 1$, когда несущая способность ЭК будет максимальна.

Именно в этом состоит ключевое положение концепции конструкционной пригодности металлов и сплавов, основанное на принципе рационального использования базового комплекса механических свойств с учетом решающей роли двух показателей резервов прочности K_{ms} и B_r , обеспечивающих силовую надежность несущей способности ЭК в условиях экстремальной перегрузки изделия.

Условие конструкционной пригодности при выбранной прочности сплава $\sigma_{0,2}$ обеспечивается не требованиями ГУ по показателям пластичности (δ , ψ_K) или вязкости (KCV, KCU), но требованию оптимизации деформационной стойкости (изломостойкости) сплава $B_r \approx B_{rb}$ при максимально возможном уровне S_K применяемого сплава. Принцип конструкционной пригодности прост – при $P_{me} \geq 1$ хрупкость изделия невозможна, но ломкость при перегрузке не исключается. Чем больше показатель $P_{me} \gg 1$, тем сильнее блокируется ломкость, что обеспечивает отсутствие катастрофического разрушения в виде потери прочности всего изделия.

В этом случае следует ожидать наибольшей силовой отдачи материала в данном ЭК в условиях эксплуатации, а в случае экстремальной перегрузки неизбежное разрушение ЭК не случится при нагрузках ниже расчетных и ни в коем случае не будет катастрофически хрупким. Собственно говоря, именно это и должно означать понятие силовой конструкционной надежности изделия, к чему

непрерывно направлены все усилия конструктора, создающего новые изделия.

В качестве заключительного соображения по поводу понятия оптимальной конструкционной пригодности материала уместно упомянуть о результатах проверки свойств металла, поднятого со дна океана остатков корпуса корабля “Титаник” [9], где исследованиями специалистов было установлено, что часть заклепок правого борта корабля, была выполнена из стали с пониженной пластичностью. В результате динамического удара от столкновения с айсбергом такие заклепки хрупко разрушились не только вблизи пролома, но и на большом протяжении правого борта, что привело к катастрофической потере герметичности борта на половине длины корпуса корабля со всеми трагическими последствиями известного исторического события. Очевидно, свойство конструкционной пригодности этой партии стальных заклепок оказалось недостаточным для обеспечения пластического разрушения заклепок от удара по корпусу, что позволило бы значительно уменьшить протяженность зоны разгерметизации вдоль корпуса корабля и тем самым избежать катастрофы.

По-видимому, свойство конструкционной пригодности материала может иметь не только сугубо технический, но и общецивилизационный смысл.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мешков Ю.Я., Шиян А.В. К вопросу о взаимосвязи прочности материала с прочностью элементов конструкций // Механика машин, механизмов и материалов. – 2017. – № 1(38). – С.79-86.
2. Давиденков Н.Н., Спиридонова Н.И. Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца // Заводская лаборатория. – 1945. – 11. – № 5. – С. 583-593.
3. Грищенко В.Н., Мешков Ю.Я., Полушкин Ю.А., Шиян А.В. Влияние прочности на охрупчиваемость сталей // Металлофизика и новейшие технологии. – 2015. – 37. – № 7. – С. 961-971.
4. Мешков Ю.Я., Шиян А.В., Грищенко В.Н. Пределы рационального упрочнения конструкционных сталей // В сб. науч. трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение», Вып. 89, Серия «Стародубовские чтения 2016», Днепропетровск, 2016. – С. 112-118.
5. Морозов Ю.Д. Микролегирование как путь повышения механических и технологических свойств строительных сталей // МТОМ. – 2001. – № 3. – С.21-37.
6. Мешков Ю. Я., Котречко С.А., Шиян А. В. Механическая стабильность металлов и сплавов. – Киев: Наук. думка, 2014. – 278 с.
7. Шиян А. В., Мешков Ю.Я. Охрупчивание металлических сплавов в условиях концентрации напряжений. Конструкционные стали и титановые сплавы. – Саарбрюккен, Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 113 с.
8. Шиян А.В., Котречко С.А., Мешков Ю.Я., Сорока Е.Ф., Носенко О.П., Федорова И.С. Взаимосвязь свойств прочности, пластичности и механической стабильности конструкционных сталей // МТОМ. – 2013. – № 4. – С. 12–30.
9. Мак-Ивили А.Дж. Анализ аварийных разрушений. – М.: Техносфера, 2010. – 416 с.

Статья рекомендована к публикации д-рами техн. наук, В.И. Большаковым и Д.В. Лаухиным (Украина)