

PACS numbers: 46.50.+a, 62.20.fk, 62.20.fq, 62.20.mj, 62.20.mm, 62.20.mt, 81.40.Np

О конструкционной эффективности использования прочности металла в изделиях и металлоконструкциях, содержащих концентраторы напряжений

Ю. Я. Мешков, С. А. Котречко, А. В. Шиян

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,
бульв. Академика Вернадского, 36,
03142 Киев, Украина*

В статье рассмотрен вопрос о мерах повышения уровня безопасного силового нагружения несущих элементов конструкций путём определения оптимального комплекса прочностных и пластических свойств металла, согласованного с особенностями напряжённо-деформированного состояния изделия, содержащего в себе определённый концентратор напряжений. На примере результатов испытаний образцов с кольцевыми надрезами на одноосное растяжение установлены пороговые значения специального показателя резервных свойств прочности и пластичности сталей — деформационной стойкости (изломостойкости) B_{rb} , ниже которых должно наблюдаться снижение несущей способности надрезанного образца σ_{NF} , как признак охрупчивания изделия в условиях концентрации напряжений. Введено понятие о коэффициенте несущей способности K_N металла в изделии с концентратором напряжений, как о показателе, отражающем степень использования прочности металла для обеспечения несущей способности изделия.

Ключевые слова: прочность, пластичность, деформационная стойкость, концентратор напряжений, порог охрупчивания, коэффициент несущей способности.

Corresponding author: Yu. Ya. Meshkov
E-mail: meshkov0305@gmail.com

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

Citation: Yu. Ya. Meshkov, S. O. Kotrechko, and A. V. Shiyan, About Construction Efficiency of the Use of Strength of Metal in Products and Metal Constructions Containing Stress Concentrators, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 5: 633–646 (2019), DOI: [10.15407/mfint.41.05.0633](https://doi.org/10.15407/mfint.41.05.0633).

У статті розглянуто питання про заходи підвищення рівня безпечного силового навантаження несних елементів конструкцій шляхом визначення оптимального комплексу властивостей міцності і пластичності металу, узгодженого з особливостями напружено-деформованого стану виробу, що містить в собі певний концентратор напружень. На прикладі результатів випробувань зразків з кільцевими надрізами на одновісний розтяг встановлені порогові значення спеціального показника резервних властивостей міцності і пластичності сталей — деформаційної стійкості (зломостійкості) B_{rb} , нижче яких повинно спостерігатися зниження несної здатності надрізаного зразка σ_{NF} , як ознака окрихчення виробу в умовах концентрації напружень. Введено поняття про коефіцієнт несної здатності K_N металу у виробі з концентратором напружень, як про показник, що відображає ступінь використання міцності металу для забезпечення несної здатності виробу.

Ключові слова: міцність, пластичність, деформаційна стійкість, концентратор напружень, поріг окрихчення, коефіцієнт несної здатності.

The article considers the issue of measures to increase the level of safe power loading of bearing elements of structures by determining the optimal complex of strength and plastic properties of the metal in consistent with the characteristics of the stress-strain state of a product containing a specific stress concentrator. Using the results of testing samples with circumferential notches for uniaxial tension, the threshold values of a special indicator of reserve properties of strength and ductility of steels—deformation endurance (break resistance) B_{rb} are determined. Below these values, a reduction in the carrying capacity of the notched sample σ_{NF} as a sign of stress concentration will be observed. A concept of the coefficient of carrying capacity K_N of metal in a product with a stress concentrator is introduced as an indicator reflecting the degree of use of the strength of the metal to ensure the carrying capacity of the product.

Key words: strength, plasticity, deformation endurance, stresses concentrator (SC), embrittlement threshold, load bearing capacity.

(Получено 5 ноября 2018 г.)

1. ВСТУПЛЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Несущая способность σ_{NF} нагруженного элемента конструкции, содержащего в себе конструктивный (регулярный) или случайный концентратор напряжений (КН), существенно зависит не только от прочности ($\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести), но и от пластичности (ψ_K — относительное сужение образца в момент разрушения при испытаниях на растяжение) металла. У хрупкого материала ($\psi_K \rightarrow 0$) для среднего (номинального) напряжения разрушения σ_{NF} образца с КН неизбежно условие $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$, что означает катастрофическую потерю несущей способности изделия и полную неэффективность ис-

пользования имеющейся у материала прочности [1]. Вообще говоря, следует различать свойство прочности самого металла $\sigma_{0,2}$ и уровень проявления этого свойства в изделии, находящемся в условиях сложного (неоднородного) напряженно-деформированного состояния (НДС). Это свойство принято трактовать как конструкционную прочность изделия (σ_{NF}), которая, в зависимости от запаса пластичности металла, может по-разному соотноситься с величиной $\sigma_{0,2}$, что позволяет говорить о мере эффективности реализации имеющегося потенциала прочности металла в реальном изделии.

Показатель эффективности использования прочности металла в изделии можно представить в виде коэффициента несущей способности K_N :

$$K_N = \sigma_N / \sigma_{0,2}, \quad (1)$$

Для увеличения показателя K_N в изделии, находящемся в условиях действия неоднородного силового поля (НСП), требуется повышение пластических свойств металла, но для каждого изделия рубежи целесообразного увеличения σ_{NF} подбираются индивидуальным путем. В работах [2, 3] на примере результатов испытаний образцов с кольцевым КН ($D = 8$ мм, $t = 1,4$ мм — далее КН типа К1, где: D — внешний диаметр образца, t — глубина надреза; $r = 0,25$ мм, угол надреза 45°) были установлены пределы рационального повышения прочности различных конструкционных сталей (КС), в том числе оптимизированных (наилучших), в условиях действия НСП при одноосном растяжении. Показано, что повышение несущей способности σ_{NF} таких образцов возможно лишь в том случае, если рост прочности металла $\sigma_{0,2}$ сочетается с достаточно высоким запасом пластических свойств, который достигает своего предела на разных уровнях σ_{NF} для сталей разных классов прочности (рис. 1).

Повышение прочности ($\sigma_{0,2}$) КС по-разному отражается на изменении пластических свойств (ψ_K), в зависимости от способа упрочнения, который может быть либо структурным (изменением состава и структуры стали), либо бесструктурным, от внешнего воздействия на сплав, например, от снижения температуры.

В этой связи имеет смысл в свойстве прочности, в целом, выделить составляющие ее части, своеобразную структуру этого свойства. Часть прочности (при упругой деформации), содержащуюся в показателе условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, можно признать технически главной, основной, так как на ней, в первую очередь, базируется несущая способность изделия σ_{NF} , а упруго-пластическую или деформационную часть можно считать резервной, поскольку в ней содержится резерв пластичности сплава, проявляющийся при растяжении образца в интервале напряжений от $\sigma_{0,2}$ до истинного напряжения разрушения в «шейке» образца — S_K .

Характеристику S_K можно считать показателем полной прочности металла при растяжении.

Именно от соотношения величин основной ($\sigma_{0,2}$) и резервной части (от $\sigma_{0,2}$ до S_K) прочностей зависит эффективность проявления

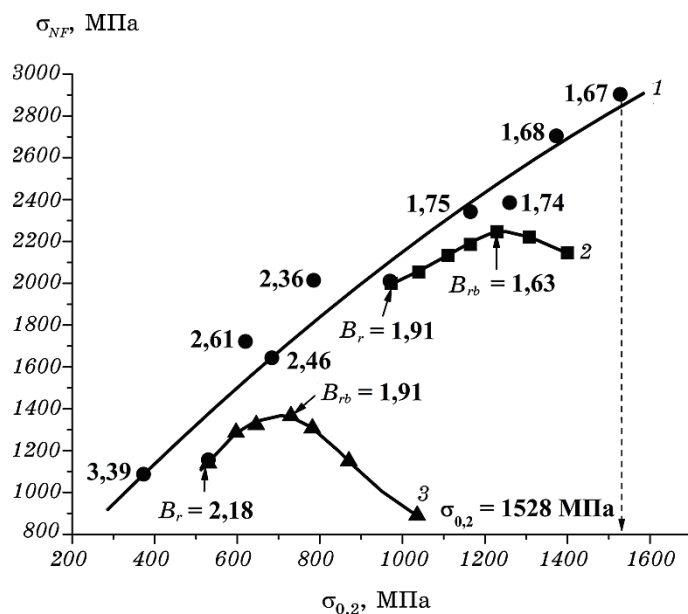


Рис. 1. Закономерности влияния увеличения прочности $\sigma_{0,2}$ конструкционных сталей на уровень несущей способности σ_{NF} образцов с КН типа К1 под воздействием: 1 — структурного фактора (повышение прочности путем регулирования структурой), цифры возле экспериментальных точек — значения изломостойкости B_r [2], $\sigma_{0,2} = 1528$ МПа — сталь 30ХГСА (закалка при 880°C + отпуск при 300°C , 0,5 ч) — табл. 1–3 — температурного фактора (повышение прочности путем снижения температуры $T < T_K$ (293 К)); экспериментальные данные [4]: 2 — сталь 30ХГСА (закалка при 880°C + отпуск при 520°C , 1 ч), 3 — сталь 40 (нормализация при 880°C); изломостойкость: B_r — исходная при 293 К; B_{rb} — критическая при температуре охрупчивания T_b по [2, 5].

Fig. 1. Regularities of the effect of increasing the strength σ_Y of structural steels on the level of the carrying capacity σ_{NF} of samples with SC of type K1 under the influence of: 1—structural factor (increasing strength by adjusting the structure), figures near the experimental points—break resistance B_r [2], $\sigma_Y = 1528$ MPa—steel 30ХГСА (quenching at 880°C + tempering at 300°C , 0.5 h)—Tables 1–3—temperature factor (increase in strength by reducing the temperature $T < T_r$ (293 K)); experimental data [4]: 2—steel 30ХГСА (quenching at 880°C + tempering at 520°C , 1 h), 3—steel 40 (normalization at 880°C); break resistance: B_r —initial at 293 K; B_{rb} —critical at embrittlement temperature T_b according to [2, 5].

свойства прочности в нагруженном изделии, а это соотношение сильно зависит от способа упрочнения — структурного или температурного.

Из рисунка 1 следует, что при понижении температуры прочность образца с КН σ_{NF} изменяется немонотонно (кривые 2 и 3) и резко снижается после достижения максимума. Это связано с проявлением механического охрупчивания под действием КН, развивающегося вплоть до катастрофической хрупкости изделия по признаку $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$. Выявление этого порога охрупчивания КС и оценка его влияния на потерю конструкционной прочности изделий с КН — задача настоящей работы.

2. ПРИВЕДЕННАЯ КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ — ИНДИКАТОР СИЛОВОЙ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЯ С КН

Охрупчивающее действие сильно неоднородных НДС в зонах КН (надрезы, трещины и т.п.) явно проявляется в двух аспектах механического поведения изделия — прочностном и пластическом. Но если пластичность образца с КН ψ_N резко падает уже при климатических, в том числе комнатной ($T_K = 293$ К), температурах, то его несущая способность σ_{NF} , вследствие эффекта стеснения текучести, при кольцевом надрезе образца в определенной мере даже увеличивается и при снижении температуры испытания продолжает нарастать в абсолютных значениях σ_{NF} (рис. 2), хотя в относительных единицах величина K_N по (1), напротив, понижается — вначале умеренно, но после пороговой температуры начала охрупчивания T_b очень резко, вплоть до значений $K_N < 1$ (табл. 1).

Как видим, конструкционная прочность, приведенная к исходной базовой прочности в показателе K_N по (1), может служить четким индикатором развития эффекта охрупчиваемости КС от действия КН вплоть до наступления критического порога технической хрупкости изделия при $K_N \leq 1$.

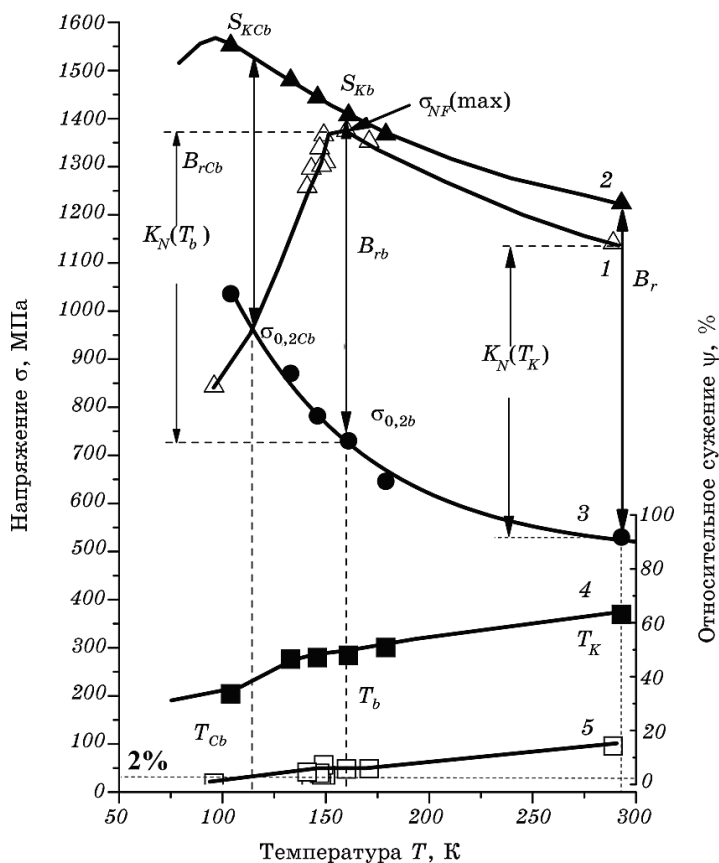
Представляется интересным установить связь такого порогового значения K_N с критическим уровнем какого-либо базового механического свойства КС. Из рисунка 2 видно, что при температуре T_b для показателей пластичности как гладких образцов (ψ_K — кривая 4 на рис. 2), так и на образцах с КН (ψ_N — кривая 5 на рис. 2) нет каких-либо особых признаков критического поведения, в отличие от показателя σ_{NF} , имеющего при T_b отчетливо обозначенный максимум. В работах [2, 4, 5] при анализе температурной зависимости $\sigma_{NF}(T)$ авторы использовали не показатели пластичности ψ_K или ψ_N , а особый показатель деформационной стойкости (изломостойкости) металла B_r :

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

который отражает резерв деформационного упрочнения КС на участке ее пластического деформирования от $\sigma_{0,2}$ до момента разрушения гладкого образца в «шейке» S_K , что, в сущности, служит обобщенным показателем скрытых в металле ресурсов пластического поведения в условиях простейшего, практически линейного растяжения (если пренебречь незначительным стеснением текучести в области «шейки» в месте разрыва [6]). Величина B_r по (2), по аналогии с параметром K_N , в сущности, является также и показателем приведенной предельной прочности металла, что подчеркивает близость физической природы этих двух показателей приведенной прочности — собственно металла (B_r) и металла в изделии (K_N).

Если показатель приведенной прочности металла B_r отражает внутренние резервы прочности металла, то величина приведенной конструкционной прочности K_N обозначает меру использования этого ресурса прочности металла в несущей способности изделия σ_{NF} , что можно представить также как коэффициент использования

Рис. 2. / Fig. 2.



Продолжение рис. 2. / Continuation of Fig. 2.

Рис. 2. Температурные зависимости стали 40 (нормализация 880°C) по результатам испытаний гладких образцов и образцов с КН типа К1 [2] (№ 1 в табл. 1): 1 — среднего номинального напряжения разрушения σ_{NF} образца с КН; 2 — истинного напряжения в момент разрушения гладкого образца S_K ; 3 — условного предела текучести $\sigma_{0,2}$; 4 — относительного сужения в момент разрушения гладкого образца ψ_K ; 5 — то же для образца с КН ψ_N ; экспериментальные данные: темные маркеры — без КН; светлые маркеры — под действием КН; T_b — критическая температура в момент начала охрупчивания; критические прочности при T_b : $\sigma_{0,2b}$ — условный предел текучести, S_{Kb} — истинное напряжение в момент разрушения гладкого образца; изломостойкости [5]: B_r — исходная при 293 К, B_{rb} — критическая при T_b ; коэффициенты несущей способности: $K_N(T_K)$ — при T_K , $K_N(T_b)$ — при T_b ; T_{Cb} — критическая температура технической хрупкости образца с надрезом; критические прочности при T_{Cb} : $\sigma_{0,2Cb}$ — условный предел текучести, S_{KCb} — истинное напряжение разрушения гладкого образца, B_{rCb} — критическая изломостойкость в момент хрупкости образца с КН.

Fig. 2. Temperature dependences for steel 40 (normalization 880°C) according to the results of tests of smooth specimens and specimens with SC of type K1 [2] (No. 1 in Table 1): 1—average nominal stress σ_{NF} of destruction of specimen with SC; 2—true stress at the moment of destruction of a smooth specimen S_f ; 3—yield strength σ_y ; 4—relative necking at the time of destruction of a smooth specimen ψ_f ; 5—the same for specimen with SC ψ_N ; experimental data: dark markers—without SC; light markers—under the action of SC; T_b —critical temperature at the start of embrittlement; critical strengths at T_b : σ_{Yb} —yield strength, S_{fb} —true stress at the moment of destruction of a smooth specimen; break resistance [5]: B_r —initial at 293 K, B_{rb} —critical at T_b ; load bearing capacities: $K_N(T_r)$ —at T_r , $K_N(T_b)$ —at T_b ; T_{Cb} —critical temperature of technical brittleness of the specimen with a notch; critical strengths at T_{Cb} : σ_{YCb} —yield strength, S_{fCb} —true stress at the moment of destruction of a smooth specimen, B_{rCb} —critical break resistance at the time of brittleness of the specimen with SC.

прочности металла в изделии.

Соотношение $K_N/B_r > 1$ означает, что эффективность использования прочности металла в нагруженном изделии вполне приемлема и чем больше указанное соотношение, тем надежнее изделие защищено от охрупчивания, тем выше конструкционная эффективность реализации прочности металла в изделии, т.е. тем больше его конструкционная пригодность для изделия в заданных условиях оценки механических свойств металла.

Рассматриваемая здесь проблема может представлять интерес для практического применения, например, в областях машиностроения, заинтересованных в эффективном использовании высокопрочных крепежных соединений, имеющих винтовую нарезку. Потеря несущей способности стальных болтов из-за чрезмерного их

упрочнения исследовалась в работе [7], из которой следует, что потребность в повышении коэффициента использования прочности КС в подобных изделиях вполне актуальна.

ТАБЛИЦА 1. Влияние температурной зависимости прочности сталей 40 и 30ХГСА на параметры несущей способности (σ_{NF} и K_N) образцов с кольцевым КН типа К1 по данным [2].

TABLE 1. The effect of temperature dependence of the strength of steels 40 and 30XGSA on the parameters of the carrying capacity (σ_{NF} and K_N) of samples with annular SC of type K1 according to [2].

№ п/п	КС	ТО*	$T_{исп}$, К	$\sigma_{0,2}$, МПа	S_K , МПа	B_r/B_{rb}	P_{me}	σ_{NF} , МПа	K_N
1	Сталь 40	Н 880°C	293	530	1154	2,18/1,91	1,14	1156	2,18
			160	741	1414	1,91/1,91	1,00	1374	1,85
			104	969	1532	1,58/1,91	0,83	890	0,92
			96	1005	1560	1,55/1,91	0,81	843	0,84
2		ОЖ 880°C	293	373	1265	3,39/2,18	1,55	1087	2,91
			144	655	1430	2,18/1,81	1,20	1330	2,03
			129	703	1447	2,06/1,81	1,14	1030	1,47
			80	950	1500	1,58/1,8	0,87	610	0,64
3	30ХГСА	З+ОП 400°C, 1 ч	293	684	1616	2,46/1,80	1,37	1643	2,50
			134	981	1768	1,80/1,60	1,13	1737	1,77
			110	1100	1900	1,72/1,60	1,07	1100	1,0
4		Н 920°C	293	729	1538	2,11/2,05	1,03	1340	1,84
			161	829	1702	2,05/2,05	1,00	1595	1,92
			143	835	1730	2,07/2,05	1,01	1260	1,51
			128	850	1700	2,0/2,05	0,98	850	1,0
5		З+ОП 300°C, 0,5 ч	110	900	1750	1,94/2,05	0,97	500	0,56
			293	1528	2511	1,67/1,6	1,04	2903	1,93
			190	1602	2566	1,60/1,6	1,00	2831	1,77
			140	1700	2570	1,5/1,6	0,94	1700	1,0
6		З+ОП 400°C, 1 ч	293	1260	2194	1,74/1,75	1,0	2385	1,89
	247		1300	2271	1,75/1,70	1,03	2545	1,96	
	80		1700	2400	1,41/1,70	0,83	1950	1,15	
			70	1800	2450	1,36/1,70	0,80	1800	1,0

Примечания: ТО — термообработка; Н — нормализация; ОЖ — отжиг; З* — закалка при 880°C; ОП — отпуск.

3. ВЛИЯНИЕ РЕЗЕРВОВ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛА НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ С КН

Детальный анализ полученных с участием авторов экспериментальных данных по влиянию прочности КС ($\sigma_{0,2}$) на несущую способность (σ_{NF}) образцов с КН типа К1 [2] (табл. 2), позволяет выработать основы концепции регулирования конструкционной эффективности использования прочности металла в изделии.

В работе [2] исследовали несущую способность образцов с КН типа К1 на сталях 40 и 30ХГСА с различной ТО и уровнем исходной прочности $373 \text{ МПа} \leq \sigma_{0,2} \leq 1528 \text{ МПа}$. Отдельно изучали изменение этих показателей в результате охлаждения указанных КС до температуры жидкого азота (77 К) — см. рис. 1, 2 и табл. 1. При этом от-

ТАБЛИЦА 2. Влияние прочности и резервов прочности на параметры несущей способности σ_{NF} и K_N при температурах испытаний T_K (293 К) и T_b , а также на показатель конструкционной пригодности P_{me} сталей 40 и 30ХГСА по данным испытаний образцов с кольцевым КН типа К1 [2].

TABLE 2. Effect of strength and strength reserves on the parameters of the carrying capacity σ_{NF} and K_N at test temperatures T_r (293 К) and T_b , as well as on the factor of structural suitability P_{me} of steels 40 and 30ХГСА according to test data of specimens with ring SC of type К1 [2].

№	КС	ТО*	$\sigma_{0,2}$, МПа	B_r	σ_{NF} , МПа	K_N	T_b , К	$\sigma_{0,2b}$, МПа	B_{rb}	σ_{NFb} , МПа	K_{Nb}	P_{me} [5]
1	Сталь 40	ОЖ 880°C	373	3,39	1087	2,91	144	655	2,18	1330	2,03	1,55
2		Н 880°C	530	2,18	1156	2,18	160	741	1,91	1374	1,85	1,14
3		З+ОП 560°C, 1 ч	620	2,61	1722	2,78	133	971	1,78	1867	1,92	1,46
4		З+ОП 400°C, 1 ч	684	2,46	1643	2,50	134	981	1,80	1737	1,77	1,37
5		З+ОП 380°C, 1 ч	785	2,36	2014	2,57	130	1136	1,75	2272	2,0	1,35
6	30ХГСА	Н 920°C	729	2,11	1340	1,84	161	829	2,05	1595	1,92	1,03
7		З+ОП 520°C, 1 ч	970	1,91	2010	2,07	87	1248	1,63	2249	1,80	1,17
8		З+ОП 400°C, 1 ч	1260	1,74	2385	1,89	247	1300	1,75	2545	1,96	1,0
9		З+ОП 300°C, 0,5 ч	1528	1,67	2903	1,93	190	1602	1,60	2831	1,77	1,04

мечали свойства сталей при критической температуре начала охрупчивания T_b по признаку максимума несущей способности σ_{NF} (max) и соответствующие значения изломостойкости B_r и B_{rb} (рис. 2, табл. 2). По исходным данным [2] вычисляли параметры K_N при T_K и K_{Nb} при T_b , а также определяли критические значения $\sigma_{0,2Cb}$ и B_{rCb} при температуре технической хрупкости T_{Cb} (рис. 2) по критерию:

$$\sigma_{NF} = \sigma_{0,2}. \quad (3)$$

При $T < T_{Cb}$ имеем $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$ и конструкционная эффективность использования прочности таким изделием становится неприемлемой: $K_N < 1$.

На рисунке 3 приведены зависимости величины коэффициента несущей способности K_N от прочности $\sigma_{0,2}$ для исследованных КС по данным табл. 1.

Из рисунка 3 видно, что повышение исходной прочности $\sigma_{0,2}$ КС при комнатных температурах T_K в результате улучшения их структуры путем изменения режимов закалки и отпуска влияет на снижение показателя K_N очень плавно вплоть до значения прочности $\sigma_{0,2} \approx \approx 1500$ МПа, когда показатель K_N для комнатных температур стабилизируется на уровне $\sim 1,9$ (штриховая кривая 7 на рис. 3), но весьма резко снижает K_N при температурном способе упрочнения в зоне $T < < T_b$ (рис. 2) до значений $K_N < 1$. Это означает, что в температурном варианте упрочнения рост прочности $\sigma_{0,2}$ только за счет основной ее части ($\sigma_{0,2}$) без сохранения резервной (B_r) ведет к катастрофической потере несущей способности по показателю K_N . При структурном увеличении прочности $\sigma_{0,2}$, когда потери в показателе B_r незначительны, несущая способность σ_{NF} только нарастает (рис. 1).

Причина такого различия очевидна — для величины показателя K_N регулирующая роль принадлежит базовому резерву прочности стали — B_r по (2), что вполне наглядно показано на рис. 4.

Из изменений показателя K_N на рис. 4 хорошо видно, что величина B_r обладает весьма четким пороговым признаком B_{rb} , который предупреждает о резком срыве несущей способности σ_{NF} при пересечении порога охрупчивания изделия $T < T_b$ (рис. 2). Обращает на себя внимание, что показатель K_N обладает очень слабой чувствительностью к изменению B_r на устойчивой, докритической стадии изменения B_r :

$$B_r > B_{rb}, \quad (4)$$

но очень резкой чувствительностью к небольшому изменению B_r ниже B_{rCb} . Такая резкая критичность роли B_r в регулировании σ_{NF} очень важна в практическом отношении, так как позволяет уверенно установить зону устойчивого обеспечения надежной несущей

способности изделия по (4) и зону, угрожающую силовой надежности изделия. Но поскольку фактор B_r всегда можно рассчитать по справочным данным, то задача сводится лишь к определению критического, порогового уровня B_{rb} .

При этом необходимо учесть зависимость величины B_{rb} от прочности стали, поскольку по мере роста прочности (от 373 до 1528 МПа, табл. 2) B_{rb} снижается в интервале значений от 2,18 до 1,60. Но вследствие того, что даже при $B_r < B_{rb}$ еще имеется определенный интервал пригодности материала ($K_N \geq 1$), то эта переходная зона неустойчивой пригодности может служить полезным «буфером»

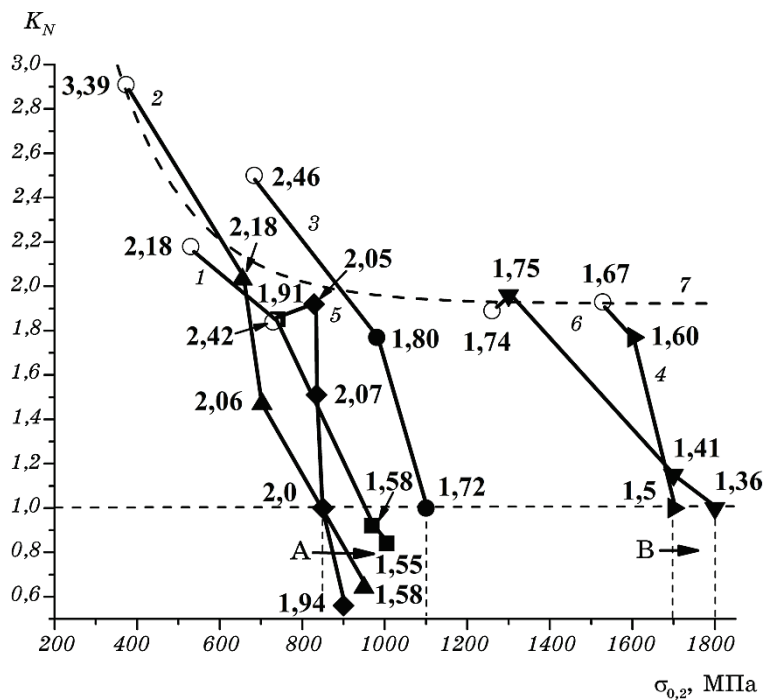


Рис. 3. Влияние прочности $\sigma_{0,2}$ КС на коэффициент несущей способности K_N ; кривые 1–6 — номера КС в табл. 1; цифры возле экспериментальных точек — значения B_r ; светлые точки — данные при T_r (293 К); темные точки — данные при $T < T_r$; А — область охрупчивания КС низкой и средней прочности ($\sigma_{0,2} \leq 1000$ МПа), В — то же для высокопрочных КС ($\sigma_{0,2} > 1000$ МПа); 7 — штриховая линия — усредненная зависимость $K_N = f(\sigma_{0,2})$ при T_r .

Fig. 3. The effect of strength σ_Y of constructional steel (CS) on the coefficient of carrying capacity K_N ; curves 1–6—numbers of SC in Table 1; numbers near experimental points— B_r values; light points—data at T_r (293 K); dark dots—data at $T < T_r$; A—area of embrittlement of CS with low and medium strength ($\sigma_Y \leq 1000$ MPa), B—the same for high-strength CS ($\sigma_Y > 1000$ MPa); 7—the dashed line presents the averaged dependence $K_N = f(\sigma_Y)$ at T_r .

для сохранения уровня несущей способности $\sigma_{NF} > \sigma_{0,2}$. И только за-
предельно сильное падение B_r ведет к катастрофическому хрупкому
разрушению изделия:

$$B_r \leq B_{rcb}. \quad (5)$$

В рамках такого подхода можно установить, например, для изде-
лий с концентратором типа К1 нормативный показатель $[B_r] \geq 2,2$
для всех классов прочности КС, что будет с избытком гарантировать
не только защиту от хрупкости изделия, но и высокую эффектив-
ность использования прочности стали ($K_N \gg 1$).

Поскольку с ростом показателя деформационной стойкости B_r
коэффициент несущей способности K_N также имеет тенденцию к

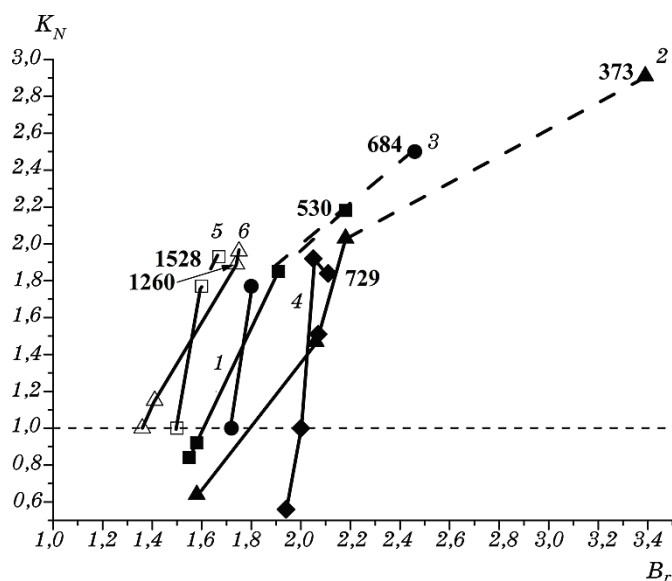


Рис. 4. Взаимосвязь коэффициента несущей способности K_N с показателем деформационной стойкости (изломостойкости) B_r КС (табл. 1) на докритической $T > T_b$ (штриховые линии) и закритической (сплошные линии) стадиях конструкционной пригодности; кривые 1–6 — номера КС в табл. 1; цифры возле экспериментальных точек — значения исходной прочности $\sigma_{0,2}$; КС низкой и средней прочности — темные маркеры, высокопрочные КС — светлые маркеры.

Fig. 4. The relationship between coefficient of carrying capacity K_N and factor of deformation endurance (break resistance) B_r of CS (Table 1) at the subcritical $T > T_b$ (dashed lines) and supercritical (solid lines) stages of structural suitability; curves 1–6—numbers of CS in Table 1; the numbers near the experimental points are the values of the initial strength $\sigma_{0,2}$; CS low and medium strength CS—dark markers, high-strength CS—light markers.

росту, то полезно установить взаимосвязь K_N с мерой относительного превышения B_r над критическим, пороговым уровнем B_{rb} :

$$P_{me} = B_r/B_{rb}. \quad (6)$$

На рисунке 5 показано, что в таком виде взаимосвязь K_N и B_r представляется более компактной и однозначно устанавливает условия

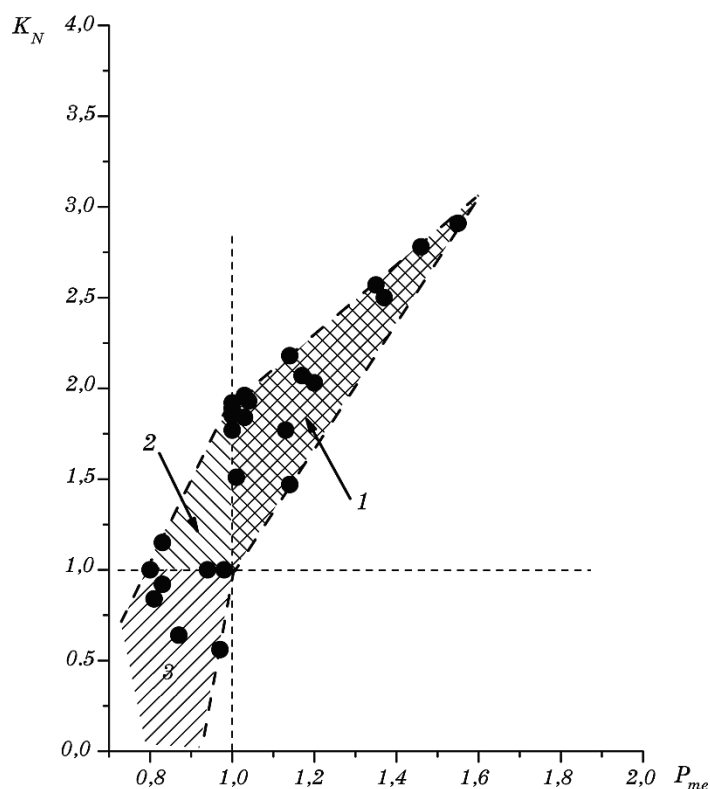


Рис. 5. Зависимость коэффициента несущей способности K_N для образцов с КН типа К1 для КС разного уровня прочности от параметра резерва конструкционной пригодности P_{me} (табл. 1). Порог охрупчиваемости сталей: $P_{me} = 1$; порог конструкционной непригодности: $K_N \leq 1$; 1 — зона устойчивой конструкционной пригодности ($P_{me} \geq 1, K_N \geq 1$), 2 — зона неустойчивой пригодности ($P_{me} < 1, K_N \geq 1$), 3 — зона непригодности ($P_{me} < 1, K_N < 1$).

Fig. 5. The dependence of the coefficient of carrying capacity K_N for specimens with SC of type K1 for CS of different levels of strength from the parameter of reserve of structural suitability P_{me} (Table 1). Steel embrittlement threshold: $P_{me} = 1$; structural unsuitability threshold: $K_N \leq 1$; 1—zone of sustainable structural suitability ($P_{me} \geq 1, K_N \geq 1$), 2—zone of unstable suitability ($P_{me} < 1, K_N \geq 1$), 3—zone of unsuitability ($P_{me} < 1, K_N < 1$).

силовой надежности изделия по параметру конструкционной пригодности металла P_{me} [5] выше порога его охрупчиваемости $P_{me} \geq 1$.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В изделиях, работающих в условиях сильно неоднородных силовых полей (изгиб, концентраторы напряжений, в том числе трещины и т.п.), зачастую невозможно в полной мере использовать прочность металла из-за охрупчивания. В качестве меры эффективности использования прочности металла в изделии можно применять коэффициент K_N , определяемый как отношение напряжения разрушения изделия σ_{NF} к прочности металла $\sigma_{0,2}$. Установлено, что величина K_N напрямую связана с показателем изломостойкости B_r металла, характеризующим его запас пластичности.

Предлагаемый подход может оказаться полезным, например, в решении задачи повышения прочности и надежности крепежных изделий из сталей и иных конструкционных сплавов.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Сталь*, № 11: 54 (2018).
2. В. Н. Грищенко, Ю. Я. Мешков, Ю. А. Полушкин, А. В. Шиян, *Металлофиз. новейшие технол.*, 37, № 7: 961 (2015).
3. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, Г. П. Зимина, *Сталь*, № 6: 47 (2018).
4. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, В. Н. Грищенко, *Сб. научн. трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение»* (Днепропетровск: Изд. ПГАСА: 2016), том 89, с. 112.
5. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Сталь*, № 4: 46 (2018).
6. Н. Н. Давиденков, Н. Н. Спиридонова, *Заводская лаборатория*, 11, № 6: 583 (1945).
7. В. С. Гнучев, *Проблемы прочности*, № 4: 113 (1977).

REFERENCES

1. Yu. Ya. Meshkov and A. V. Shiyan, *Stal'*, No. 11: 54 (2018) (in Russian).
2. V. M. Gryshchenko, Yu. Ya. Meshkov, Yu. O. Polushkin, and A. V. Shiyan, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 37, No. 7: 961 (2015) (in Russian).
3. Yu. Ya. Meshkov, A. V. Shiyan, and G. P. Zimina, *Stal'*, No. 6: 47 (2018) (in Russian).
4. Yu. Ya. Meshkov, A. V. Shiyan, and V. N. Grishchenko, *Collection of Scientific Proceedings of 'Construction, Materials Science, Mechanical Engineering'* (Dnepropetrovsk: Izd. PGASA: 2016), vol. 89, p. 112 (in Russian).
5. Yu. Ya. Meshkov and A. V. Shiyan, *Stal'*, No. 4: 46 (2018) (in Russian).
6. N. N. Davidenkov and N. N. Spiridonova, *Zavodskaya Laboratoriya*, 11, No. 6: 583 (1945) (in Russian).
7. V. S. Gnuchev, *Problemy Prochnosti*, No. 4: 113 (1977) (in Russian).