

УДК 669.017:539.4; 538.951-405

## ПРЕДЕЛЫ РАЦИОНАЛЬНОГО УПРОЧНЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

МЕШКОВ Ю.Я.<sup>1</sup>, чл.-корр. НАН Украины, д.т.н., профессор,  
ШИЯН А.В.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н.,  
ГРИЩЕНКО В.Н.<sup>1</sup>, м.н.с.

<sup>1</sup> Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, бульвар Вернадского, 36, 02142, Киев, Украина, тел. +38 (044) 452-13-52, e-mail: [shyian\\_av@ukr.net](mailto:shyian_av@ukr.net)

**Аннотация.** *Цель.* Для конструкционных сталей увеличение их прочности целесообразно лишь при условии сопутствующего повышения конструкционной прочности изделий и элементов конструкций, что связано с отсутствием признаков охрупчивания металла в изделиях. Задачей этой работы было установление пределов рационального повышения прочности сталей 40 и 30ХГСА на основе критерия максимальной несущей способности образцов с регламентированным надрезом. *Методика.* Испытания на растяжение стандартных гладких образцов диаметром 6 мм и образцов с кольцевым надрезом. *Результаты.* Установлена взаимосвязь условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  со средним номинальным напряжением разрушения  $\sigma_{NF}$  образца с концентратором напряжений при повышении прочности сталей в интервале от 374 МПа до 1533 МПа. Показано, что повышение несущей способности надрезанного образца возможно лишь в том случае, если показатель изломостойкости  $V_f$  стали превышает определенное критическое значение, равное 1,6...1,8 для данного вида концентратора напряжений. *Научная новизна.* Впервые показано, что снижение показателя изломостойкости  $V_f$  ниже критической величины при росте прочности  $\sigma_{0,2}$  стали служит индикатором достижения предела ее рационального упрочнения, не грозящего проявлением признаков охрупчивания при наличии концентраторов напряжений. *Практическая значимость.* Установление пределов рационального упрочнения сталей поможет в технологической практике при выборе оптимальной технологии упрочнения стали, а в инженерно-конструкторской практике – связать выбор стали для изделия с повышением его конструкционной надежности.

*Ключевые слова:* охрупчивание, ломкость, несущая способность, изломостойкость, коэффициент перенапряжения, коэффициент охрупчивания

## ГРАНИЦІ РАЦІОНАЛЬНОГО ЗМІЦНЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

МЕШКОВ Ю.Я.<sup>1</sup>, чл.-кор. НАН України, д.т.н., професор,  
ШИЯН А.В.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н.,  
ГРИЩЕНКО В.М.<sup>1</sup>, м.н.с.

<sup>1</sup> Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, бульвар Вернадського, 36, 02142, Київ, Україна, тел. +38 (044) 452-13-52, e-mail: [shyian\\_av@ukr.net](mailto:shyian_av@ukr.net)

**Анотація.** *Ціль.* Для конструкційних сталей підвищення їх міцності доцільно лише при умові супровідного підвищення конструкційної міцності виробів та елементів конструкцій, що пов'язане з відсутністю ознак окрихчення металу у виробах. Завданням цієї роботи було встановлення границь раціонального підвищення міцності сталей 40 і 30ХГСА на основі критерію максимальної несучої здібності зразків з регламентованим надрізом. *Методика.* Випробування на розтягнення стандартних гладких зразків діаметром 6 мм та зразків з кільцевим надрізом. *Результати.* Встановлено взаємозв'язок умовної межі текучості  $\sigma_{0,2}$  з середнім номінальним напруженням руйнування  $\sigma_{NF}$  зразка з концентратором напружень при підвищенні міцності сталей в інтервалі від 374 МПа до 1533 МПа. Показано, що підвищення несучої здібності надрізаного зразка можливо лише у тому випадку, якщо показник зламостійкості  $V_f$  сталі перевищує певне критичне значення, яке дорівнює 1,6...1,8 для даного виду концентратора напружень. *Наукова новизна.* Вперше показано, що зниження показника зламостійкості  $V_f$  нижче критичної величини при зростанні міцності  $\sigma_{0,2}$  сталі слугує індикатором досягнення границі її раціонального зміцнення, що не погрожує прояву ознак окрихчення при наявності концентраторів напружень. *Практична значимість.* Встановлення границь раціонального зміцнення сталей допоможе у технологічній практиці при виборі оптимальної технології зміцнення сталі, а в інженерно-конструкторській практиці – зв'язати вибір сталі для виробу з підвищенням його конструкційної надійності.

*Ключові слова:* окрихчення, ламкість, несуча здібність, зламостійкість, коефіцієнт перенапруження, коефіцієнт окрихчення.

## LIMITS OF MANAGEMENT STRENGTHENING OF STRUCTURAL STEEL

MESHKOV Yu. Ya.<sup>1</sup>, *Dr. of Tech. Sci., Corresponding Member of NAS of the Ukraine*,  
 SHIYAN A.V.<sup>1</sup>, *Cand. Sc. (Phys. and Math.)*,  
 GRISHCHENKO V.N.<sup>1</sup>, *j.r.*

<sup>1</sup> G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of NAS of the Ukraine, 36, Vernadsky av., 02142, Kyiv, Ukraine, phone: +38 (044) 452-13-52, e-mail: [shyian\\_av@ukr.net](mailto:shyian_av@ukr.net)

**Abstract. Purpose.** For structural steels to increase their strength is only advisable provided concomitant increase structural strength of products and structural elements, due to the lack of metal embrittlement features in products. The objective of this work was to determine the limits of the rational increase strength steels 40 and 30ХГСА based on the criterion of maximum load capacity models with regulated notch. **Methodology.** Tensile testing of standard samples of smooth 6 mm diameter circular specimens with notch. **Findings.** The relationship  $\sigma_{0,2}$  conditional yield strength with an average nominal voltage failure  $\sigma_{NF}$  specimens with the stress by increasing the strength of steel in the range from 374 MPa to 1533 MPa. It has been shown that increasing the bearing capacity notched specimen is only possible if the indicator  $B_r$  break resistance steel exceeds a certain critical value of 1,6...1,8 for this type of stress concentrator. **Originality.** It was shown that a decrease in break resistance  $B_r$  below the critical value with an increase in strength  $\sigma_{0,2}$  become an indicator of reaching the limit of its sound reinforcement, not threatening manifestation of signs of embrittlement in the presence of stress concentrators. **Practical value.** Establishing the limits of rational hardening steels help in technological practice in the selection of optimal technology of hardening steel, and engineering and design practice - to link the choice of steel products to increase its structural reliability.

**Keywords:** embrittlement, fragility, bearing capacity, break resistance, over-voltage coefficient, embrittlement coefficient.

## Введение

Повышение прочности конструкционных сталей и сплавов является насущной задачей металловедов и технологов металлургии, нацеленной на решение общетехнической задачи повышения несущей способности и снижения материалоемкости элементов конструкций и изделий. Однако естественной преградой на этом пути служит известная тенденция снижения пластичности, что связано с эффектом охрупчивания сплавов и с нарастанием угрозы хрупкого разрушения, связанной с катастрофической потерей несущей способности изделия. Если критерием наилучшей конструкционной надежности считать максимум силовой отдачи материала в изделии (максимум несущей способности), то предельным (пороговым) значением рационального упрочнения стали следует принять максимальный уровень прочности ( $\sigma_{0,2}$  – предел текучести), выше которого несущая способность  $\sigma_{NF}$  или условная конструкционная прочность изделия начинает систематически снижаться. Естественно, такое падение  $\sigma_{NF}$  является следствием охрупчивания сплава – явления, в котором сочетаются признаки и хрупкости, и пластичности материала. В отличие от классической (идеальной) хрупкости здесь явно присутствует эффект пластичности, но, в то же время, проявляется такой неперемный атрибут хрупкости, как лавинообразный, катастрофический характер процесса разрушения – мгновенный разлом изделия. Понятно, что такой вид разрушения не следует смешивать с идеальной хрупкостью и мы его назовем ломкостью, понимая, в качестве первого этапа охрупчивания материала, сочетающего в себе как главный признак хрупкости – катастрофический характер разрушения, так и вполне измеримую

величину свойства пластичности. По-видимому, применительно к металлическим конструкционным материалам термин “хрупкость”, строго говоря, вообще не имеет смысла и его целесообразно заменить на более компромиссный термин, например, такой, как *ломкость*.

Таким образом, в качестве критерия рационального предела упрочнения стали можно принять пороговый уровень прочности ( $\sigma_{0,2}$ ), выше которого дальнейшее повышение прочности ведет не к росту, а, наоборот, к падению несущей способности  $\sigma_{NF}$ , что связано с проявлением прогрессирующей ломкости металла.

## Цель

Задачей настоящего исследования было исследование закономерностей изменения несущей способности  $\sigma_{NF}$  стальных образцов с кольцевым надрезом при повышении уровня прочности сталей  $\sigma_{0,2}$ , достигаемым двумя принципиально разными способами: а) влиянием структуры (за счет химического состава и термообработки стали) и б) снижением температуры испытаний. Критерием предельного рационального упрочнения сталей в обоих случаях служило достижение максимума несущей способности  $\sigma_{NF}$  данного вида образцов, т.е. условие наивысшей силовой отдачи материала в заданных условиях напряженно-деформированного состояния (НДС).

## Материалы и методика исследований

Исследования выполняли на конструкционных сталях двух марок – ст.40 и 30ХГСА, предварительно обработанных на формирование структур отжига, нормализации и закалки с отпуском, обеспечивающих

получение широкого спектра их прочностей в интервале 370 – 1645 МПа, причем механические свойства оценивали при разных температурах испытаний от комнатной (+20 °С) до -196 °С, что позволило дополнительно расширить диапазон уровней прочности исследуемых сплавов.

Испытывали образцы двух типов: цилиндрические гладкие диаметром 6 мм с рабочей базой 30 мм и образцы диаметром 8 мм с кольцевым надрезом глубиной 1,4 мм и радиусом надреза R = 0,25 мм, далее – концентратор напряжений (КН).

Испытания на растяжение выполняли на универсальной испытательной машине Instron 8802 при скорости перемещения таверсы 2 мм/мин. Для испытаний при пониженных и криогенных температурах применяли специальную низкотемпературную камеру, обеспечивающую интервал температур механических испытаний от +20 °С до температуры кипения жидкого азота (-196 °С). По результатам испытаний определяли механические характеристики прочности и пластичности по результатам испытаний гладких образцов (условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , истинное напряжение  $S_K$  и относительное сужение  $\psi_K$  в момент разрушения), а также аналогичные показатели по результатам испытаний образцов с КН (напряжение общей текучести  $\sigma_{GY}$ , среднее номинальное напряжение  $\sigma_{NF}$  и относительное сужение  $\psi_N$  в момент разрушения). При этом напряжение общей текучести образца с КН  $\sigma_{GY}$  определяли с использованием метода конечных элементов.

Пример температурных зависимостей механических характеристик, определенных при испытаниях гладких образцов и образцов с КН для стали 40 (нормализация 880°С) [1] приведен на рис.1.

**Основные понятия и определения.** Для решения поставленной задачи потребуется привлечь к анализу некоторые специальные характеристики и показатели механических свойств, которые непосредственно отражают склонность металла к охрупчиванию, – механическая стабильность ( $K_{ms}$ ) [2] и изломостойкость ( $B_r$  – break resistance) [1].

На рис. 1 обозначены критические температуры хрупкости для гладких образцов –  $T_{BX}$  (верхняя температура вязко-хрупкого перехода [3]) и для образцов с КН –  $T_C$ , определенные по критерию наибольших значений величин  $S_K$  и  $\sigma_{NF}$  соответственно. Из указанных силовых показателей могут быть образованы следующие вспомогательные показатели в качестве специальных механических характеристик, полезных для проведения количественного анализа склонности стали к ее охрупчиванию по мере увеличения прочности при снижении температуры испытания: а) показатель исходной силовой выносливости или изломостойкости  $B_r$  гладкого образца:

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

б) показатель остаточной силовой выносливости или изломостойкости образца с КН:

$$B_{rNF} = \frac{\sigma_{NF}}{\sigma_{GY}}. \quad (2)$$

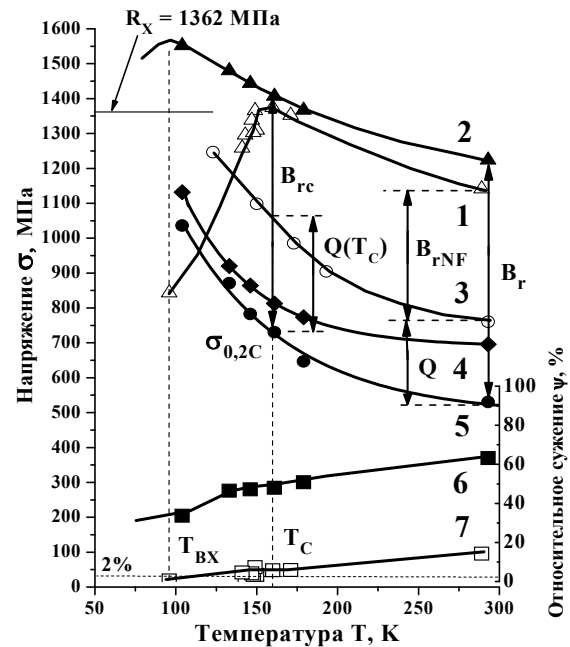


Рис. 1. Температурные зависимости стали 40 (нормализация 880 °С) по результатам испытаний гладких образцов и образцов с КН [1]: 1 – среднего номинального напряжения разрушения  $\sigma_{NF}$  образца с КН; 2 – истинного напряжения в момент разрушения гладкого образца  $S_K$ ; 3 – напряжения общей текучести  $\sigma_{GY}$ ; 4 – прочности  $\sigma_2$  при критической степени деформации  $e_c = 2\%$ ; 5 – условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$ ; 6 – относительного сужения в момент разрушения гладкого образца  $\psi_K$ ; 7 – то же для образца с КН  $\psi_N$ ; экспериментальные данные: темные знаки – без КН; светлые знаки – под действием КН

### Результаты

Та же характеристика  $B_r$ , но привязанная к критической температуре  $T_C$  образца с КН по признаку его максимальной несущей способности  $\sigma_{NF}(\max)$ , имеет смысл показателя критической силовой выносливости или критической изломостойкости этой стали для образца с данным видом КН:

$$B_{rc} = \frac{S_K(T_C)}{\sigma_{0,2C}}. \quad (3)$$

Соотношение между напряжением общей текучести образца с надрезом  $\sigma_{GY}$  и условным пределом текучести стали  $\sigma_{0,2}$  образует так называемый коэффициент перенапряжения  $Q$ , обусловленный стеснением текучести в образце [4]:

$$Q = \frac{\sigma_{GY}}{\sigma_{0,2}} \quad (4)$$

Коэффициент  $Q$  вносит существенный вклад в повышение несущей способности образца с надрезом (рис. 1) и поэтому должен принимать участие в решении рассматриваемой здесь задачи.

По своему смыслу коэффициент силовой выносливости (изломостойкости)  $V_r$  означает меру способности металла выдерживать без разрушения силовую перегрузку выше предела текучести  $\sigma_{0,2}$  (в условиях одноосного растяжения), которая выражается в величине истинного напряжения разрушения  $S_K$  в “шейке” образца. Поскольку любое испытание на разрыв всегда заканчивается резким изломом образца в шейке (или без нее), то мера выносливости  $V_r$  также может интерпретироваться как мера *изломостойкости* металла. Характеристика  $V_r$  в данном случае имеет не самостоятельное значение, так как в условиях работы стержня на растяжение она фактически не используется по причине разрыва материала в “шейке”, но важность ее является определяющей при оценке резервов силовой выносливости металла в условиях неоднородной линейной деформации, например, в крайнем волокне изгибаемого стержня или в локальной области местной деформации на контуре надреза или трещины. Именно этой особенностью характеристики  $V_r$  мы воспользуемся в данной работе при анализе критерия разрушения для образцов с КН.

Согласно рис. 1 критерий разрушения состоит в том, что, благодаря КН с величиной теоретического коэффициента концентрации напряжений  $\alpha_\sigma = 3,0$  (для исследуемого в данной работе КН) по [5], на контуре надреза формируется зона локальной пластичности, в которой, с учетом деформационного упрочнения, пиковое напряжение  $\sigma_{max}$  возрастает в  $K_\sigma$  раз по сравнению с напряжением общей текучести  $\sigma_{GY}$ , где, согласно [6], коэффициент концентрации напряжений  $K_\sigma$  имеет величину:

$$K_\sigma = \alpha_\sigma^{2n/1+n} \quad (5)$$

где  $n$  – показатель деформационного упрочнения стали по Холломону [7].

С учетом эффекта стеснения деформации под надрезом  $Q$  по (4) общий коэффициент охрупчивания  $Q_{oc}$  при критической температуре  $T_c$  образца с КН составит:

$$Q_{oc} = Q(T_c) \cdot K_{oc}, \quad (6)$$

где  $Q(T_c) = \sigma_{GY}(T_c)/\sigma_{0,2c}$ ,  $K_{oc} = \alpha_\sigma^{2n_c/1+n_c}$ ,  $n_c$  – показатель деформационного упрочнения стали при  $T_c$ .

Тогда критерий локального разрушения, инициированного надрезом на кромке контура КН (или вблизи нее) будет

$$Q_{oc} \approx V_{rc}, \quad (7)$$

где знак  $\approx$  означает, что критерий (7) носит оценочный характер и является приближенным.

**Проверка критерия разрушения образцов с надрезом в условиях максимума несущей способности.** В табл. 1 приведены экспериментальные данные параметров  $V_r$ ,  $V_{rc}$  по (1) и (3) соответственно, а также расчетные значения  $Q_{oc}$  по (6) для сталей, исследованных в работе [1].

Из табл. 1 видно, что при критической температуре испытания  $T_c$  образцов с КН по признаку максимума их несущей способности  $\sigma_{NF(max)}$  (рис. 1) критерий (7) выполняется с высокой точностью, при которой погрешность  $\delta$  расчетного определения коэффициента охрупчивания  $Q_{oc}$  относительно полученной экспериментально величины показателя критической изломостойкости  $V_{rc}$  не превышает  $\pm 5\%$ , что подтверждают изложенные выше модельные представления о механизме инициирования локального разрушения на контуре надреза. Следует подчеркнуть, что в изломах разрушенных образцов с КН отмечены явные признаки охрупчивания стали – резкая потеря пластичности  $\psi_N < 10...15\%$  (см. рис. 1) и хрупкий характер излома. В классической работе [8] даже при разрушении гладких образцов область температур ниже максимума напряжения  $S_K$  однозначно классифицирована как область хрупкого разрушения, тем более, это правомерно отнести к области резкого падения несущей способности  $\sigma_{NF}$  для образцов с КН, где проявляется очевидный эффект падения запаса *остаточной изломостойкости* стали под надрезом –  $V_{rNF}$  по (2).

Поэтому, зону разрушения надрезанных образцов ниже максимума  $\sigma_{NF(max)}$  при  $T < T_c$  будем трактовать как зону критического охрупчивания стали, в которой силовая эксплуатация такого элемента конструкции небезопасна и, следовательно, уровень прочности стали  $\sigma_{0,2c}$  в точке  $T_c$  является предельно допустимым для данного вида изделия (см. рис. 1).

Таким образом, критерий  $V_{rc} \approx Q_{oc}$  по (7) может служить оценочным инструментом для определения пределов рационального упрочнения стали в тех случаях, когда несущая способность элемента конструкции (ЭК) может быть ограничена присутствием в нем КН с известным коэффициентом концентрации  $\alpha_\sigma$  [5]. Тем самым создается предпосылка для инженерного расчета несущей способности ЭК с КН известной силы  $\alpha_\sigma$  не только в рамках чисто упругого состояния, но и за его пределами в заведомо упругопластической области деформирования.

Таблица 1

Исходные экспериментальные данные для определения показателей  $B_r$  (1),  $B_{rc}$  (3), расчетные значения коэффициента охрупчивания  $Q_{oc}$  по (6) и оценка точности определения  $Q_{oc}$  для сталей [1]

№ п/п	Сталь, обработка	$\sigma_{0,2}$ , МПа (293 К)	$S_K$ , МПа (293 К)	$T_C$ , К	$\sigma_{0,2C}$ , МПа ( $T_C$ )	$S_{Kc}$ , МПа ( $T_C$ )	$B_r$ (1)	$B_{rc}$ (3)	$Q_{oc}$ (6)	$\delta$ , %
1	ст. 40, ОЖ	374	1265	139	656	1440	3,38	<b>2,20</b>	<b>2,16</b>	-1,8
2	ст. 40, Н	530	1157	160	729	1310	2,18	<b>1,80</b>	<b>1,89</b>	5,0
3	ст. 40, 3 + ОП 560 °С, 1 ч	620	1621	133	950	1760	2,61	<b>1,85</b>	<b>1,77</b>	-4,3
4	ст. 40, 3 + ОП 400 °С, 1 ч	683	1620	134	1012	1832	2,37	<b>1,81</b>	<b>1,75</b>	-3,3
5	30ХГСА, Н	715	1650	178	807	1726	2,31	<b>2,14</b>	<b>2,08</b>	-2,8
6	ст. 40, 3 + ОП 380 °С, 1 ч	785	1848	130	1153	1941	2,35	<b>1,68</b>	<b>1,64</b>	-2,4
7	30ХГСА, 3 + ОП 520 °С, 1 ч	970	1850	128	1217	1955	1,91	<b>1,61</b>	<b>1,54</b>	-4,3
8	30ХГСА, 3 + ОП 400 °С, 1 ч	1280	2170	190	1345	2288	1,70	<b>1,70</b>	<b>1,68</b>	-1,2
9	30ХГСА, 3 + ОП 300 °С, 0,5 ч	1533	2559	193	1602	2560	1,67	<b>1,60</b>	<b>1,61</b>	0,6

Примечания: ОЖ – отжиг 880 °С; Н – нормализация 880 °С; 3 – закалка 880 °С; ОП – отпуск.

**Пределы рационального увеличения прочности сталей при наличии концентраторов напряжений.** Существует множество способов упрочнения сталей, среди которых можно выделить два принципиально различающихся вида – а) сугубо структурный, и б) условно – бесструктурный.

Первый вид характеризуется упрочнением, достигаемым изменением *основных параметров структуры* (размер зерен, количество, размер и морфология включений, текстура, пограничные выделения и пр.), вследствие использования разных приемов термообработки и регулирования состава сталей, а также пластического формоизменения изделия.

Второй вид упрочнения является следствием от использования таких внешних факторов воздействия на прочность стали, как низкая температура, динамика нагружения (ударные нагрузки), механическое стеснение деформации из-за жесткости напряженного состояния [9], а также от действия сугубо субструктурных факторов упрочнения – старения, радиационного облучения и т.п., при котором показатель прочности  $\sigma_{0,2}$  увеличивается лишь за счет составляющей сопротивления движению дислокации. Этот вид упрочнения стали можно отнести к неполноценному для обеспечения

надежности конструкции, поскольку при этом не улучшается зеренная структурная составляющая прочности, которая благоприятна для увеличения вязкости металла.

Ниже представлены два вида закономерностей влияния уровня прочности стали  $\sigma_{0,2}$  на уровень несущей способности  $\sigma_{NF}$  образцов с КН под воздействием структурного фактора (табл. 1) и температурного (табл. 2).

На рис. 2 вышеуказанные закономерности представлены графически.

Из табл. 2 и рис. 2 видно, что для образцов с КН из нормализованной стали 40 ( $\sigma_{0,2} = 530$  МПа) температурный рост прочности  $\sigma_{0,2}$  сопровождается ростом  $\sigma_{NF}$  лишь до уровня  $\sigma_{0,2} \approx 730$  МПа с максимумом  $\sigma_{NF(max)} \approx 1374$  МПа. Для более качественной стали 30ХГСА ( $\sigma_{0,2} = 973$  МПа) рост  $\sigma_{NF}$  наблюдается до максимума, равного 2246 МПа при  $\sigma_{0,2} \approx 1230$  МПа, т.е. удалось подняться по уровню оптимальной несущей способности образца с КН почти в 2 раза при росте прочности в 1,3 раза. Однако на этом ресурсы рационального упрочнения стали за счет снижения температуры, себя полностью исчерпывают, ибо дальнейшее повышение прочности обеих сталей в данном случае бесперспективно.

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

Сталь	№ п/п	T <sub>исп.</sub> , К	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{NF}$ , МПа	S <sub>K</sub> , МПа	$\sigma_{GY}$ , МПа	B <sub>r</sub>
Ст. 40 (Н) R <sub>MC</sub> = 1362 МПа	1	293	530	1145	1155	752	2,18
	2	179	646	1323	1350	972	2,09
	3	161	730*	1374*	1366	1048	1,87*
	4	146	781	1338	1405	1112	1,80
	5	133	870	1150	1455	1176	1,67
	6	104	969	890	1532	1390	1,58
	7	96	1005	843	1560	1476	1,55
30ХГСА (ОП 520 °С, 1 ч) R <sub>MC</sub> = 2015 МПа	8	293	973	2010	1850	1410	1,90
	9	235	1040	2053	1835	1464	1,76
	10	185	1111	2132	1860	1548	1,67
	11	153	1165	2185	1900	1625	1,63
	12	126	1230*	2246*	1950	1710	1,59*
	13	94	1308	2220	2020	1841	1,54
	14	77	1332	2137	2055	1902	1,54

Примечания: \* – критические показатели свойств сталей ( $\sigma_{0,2}$ , B<sub>r</sub>,  $\sigma_{NF}$ ), предельно допустимые для образцов с КН по признаку максимальной несущей способности  $\sigma_{NF(max)}$ ; R<sub>MC</sub> – характеристика хрупкой прочности (сопротивление микросколу) [2].

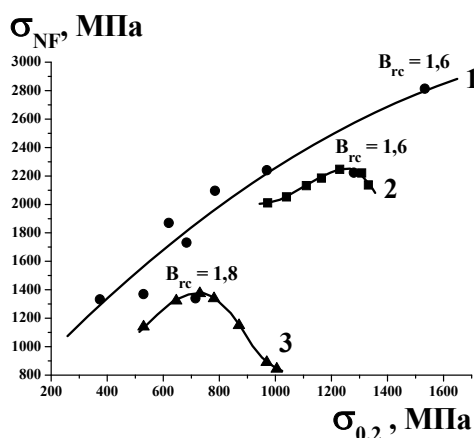


Рис. 2. Закономерности влияния уровня прочности стали  $\sigma_{0,2}$  на уровень несущей способности  $\sigma_{NF}$  образцов с КН под воздействием: 1 – структурного фактора; 2, 3 – температурного фактора (табл. 2); экспериментальные данные [1]: ● – (№№ 1-9 в табл. 1), ▲ – сталь 40 (№№ 1-7 в табл. 2), ■ – сталь 30ХГСА (№№ 8-14 в табл. 2)

В то же время на той же стали 40, но со структурой закалки и отпуска при 380 °С (№ 6 в табл. 1) при  $\sigma_{0,2} = 785$  МПа, удается поднять  $\sigma_{NF}$  до уровня 2100 МПа при комнатной температуре испытания, а наилучший результат при структурном виде упрочнения для улучшенной стали 30ХГСА (№ 9 в табл. 1) при  $\sigma_{0,2} = 1533$  МПа позволил получить уровень  $\sigma_{NF} = 2800$  МПа, что еще не означает достижение максимально возможного значения несущей способности (рис. 2).

Анализируя закономерности (рис. 2) и данные табл. 1, 2, можно заметить, что максимальный предел несущих возможностей образцов с КН, исследованных в работе [1] для сталей с разным

уровнем прочности  $\sigma_{0,2}$ , каждый раз достигается при примерно одинаковом значении показателя изломостойкости (силовой выносливости) стали по (1)  $B_r \approx 1,6 - 1,8$  (см. рис. 2) с тенденцией постоянного снижения  $B_r$  по мере роста прочности  $\sigma_{0,2}$ . По-видимому, такой уровень исходной изломостойкости можно принять для данного вида КН в качестве оптимального с точки зрения реализации наибольшей несущей способности такого вида ЭК.

#### Научная новизна и практическая значимость

В работе впервые показано, что с точки зрения потребности в реализации полноценной конструкционной прочности стали для гарантии безопасной силовой эксплуатации изделия в условиях возможной концентрации напряжений ( $\alpha_\sigma$ ) целесообразно контролировать уровень показателя специального механического свойства – силовой выносливости (или изломостойкости)  $B_r = S_K/\sigma_{0,2}$ , определяемого заранее в ходе стандартных испытаний образцов на растяжение. Превышение показателя  $B_r$  над критическим значением для данного элемента конструкции  $B_{rc} = Q_{oc}$  обеспечивает тенденцию повышения его несущей способности при росте прочности стали, что повышает конструкционную надежность изделия.

Снижение показателя  $B_r < B_{rc}$  при росте прочности  $\sigma_{0,2}$  служит индикатором достижения предела рационального упрочнения стали для данного вида элемента конструкции.

#### Выводы

1. Закономерность в виде возрастания несущей силовой способности элемента конструкции (ЭК) с ростом прочности стали существует, но она

очень ограничена в тех случаях, когда причиной упрочнения служат либо чисто субструктурные факторы прочности (старение), либо снижение температуры испытания. В этом случае, лимит допустимого упрочнения стали исчерпывается очень быстро – при достижении определенного критического уровня силовой выносливости  $V_{гс}$  (изломостойкости) металла, величина которого определяется показателем охрупчивающей силы НДС конструкции  $Q_{сс}$ . Для исследованного в данной работе типа концентратора напряжений  $V_{гс} \approx 1,6 \dots 1,8$  для разных сталей.

2. Единственно рациональным способом повышения силовой отдачи металла в ЭК (уровня  $\sigma_{НФ}$ ) служит полноценный структурный способ упрочнения – за счет измельчения структурных элементов стали, когда рост прочности  $\sigma_{0,2}$  обеспечивается вкладом зеренной составляющей, что сдерживает

нарастание охрупчиваемости сплава от присутствия надреза в образце или дефекта в изделии. Это замедляет темп приближения показателя изломостойкости  $V_{г}$  к критическому уровню  $V_{гс} \approx 1,6$  и, тем самым, предотвращает наступление этапа охрупчивания стали из-за снижения  $V_{г} < V_{гс}$ , т.е. от падения несущей способности ЭК по величине  $\sigma_{НФ}$ .

3. Система регулирования пределов рационального упрочнения стали для данного вида ЭК основана на обеспечении минимально необходимого показателя свойства изломостойкости стали  $V_{гс}$ , соответствующего данному виду ЭК при условии  $V_{г} \geq V_{гс} \approx Q_{сс}$ , где  $Q_{сс}$  – коэффициент охрупчивания, обусловленный особенностями НДС элемента конструкции (например, величиной  $\alpha_{\sigma}$ ).

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Грищенко В.Н., Мешков Ю.Я., Полушкин Ю.А., Шиян А.В. Влияние прочности на охрупчиваемость сталей под действием концентраторов напряжений // Металлофизика и новейшие технологии. – 2015. – Т.37. – № 7. – С. 961-971.
2. Мешков Ю.Я., Котречко С.А., Шиян А.В. Механическая стабильность металлов и сплавов. – К.: Наукова думка, 2014. – 277 с.
3. Шиян А. В. Физическое обоснование критерия классификации конструкционных сталей по прочности // Металлофизика и новейшие технологии. – 2011. – Т. 33. – № 12. – С. 1703-1716.
4. Нотт Дж. Основы механики разрушения. – М.: Металлургия, 1978. – 256 с.
5. Савин Г.Н., Тульчий В.И. Справочник по концентрации напряжений. – К.: Высшая школа, 1976. – 410 с.
6. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
7. Hollomon J. H. Tensile deformation // Trans. AIME. Iron Steel Div. – 1945. – Vol. 162. – P. 268-290.
8. Хан Дж., Авербах Б.Л., Оуэн В.С., Коэн М. Возникновение микротрещин скола в поликристаллическом железе и стали // Атомный механизм разрушения. – М.: Металлургиздат, 1963. – С. 109-137.
9. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – К.: Наукова думка, 1976. – 415 с.

### REFERENCES

1. Grishchenko V.N., Meshkov Yu.Ia., Polushkin Yu.A., Shiiian A.V. Vliianie prochnosti na okhrupchivaemost' stalei' pod dei'stvie koncentratorov napriazhenii' // Metallofizika i novei'shie tekhnologii. - 2015. - T.37. - № 7. - S. 961-971.
2. Meshkov Yu.Ia., Kotrechko S.A., Shiiian A.V. Mehanicheskaiia stabil'nost' metallov i splavov. - K.: Naukova dumka, 2014. - 277 s.
3. Shiiian A. V. Fizicheskoe obosnovanie kriteriia klassifikatsii konstruktsionny'kh stalei' po prochnosti // Metallofizika i novei'shie tekhnologii. - 2011. - T. 33. - № 12. - S. 1703-1716.
4. Nott Dzh. Osnovy mehaniki razrusheniia. - M.: Metallurgiiia, 1978. - 256 s.
5. Savin G.N., Tul'chii' V.I. Spravochnik po koncentratsii napriazhenii'. - K.: Vy'sshaia shkola, 1976. - 410 s.
6. Kogaev V.P., Mahutov N.A., Gusenkov A.P. Raschety' detalei' mashin i konstrukttsii' na prochnost' i dolgovechnost'. - M.: Mashinostroenie, 1985. - 224 s.
7. Hollomon J. H. Tensile deformation // Trans. AIME. Iron Steel Div. - 1945. - Vol. 162. - P. 268-290.
8. Han Dzh., Averbakh B.L., Owen V.S., Koe'n M. Vozniknovenie mikrotreshchin skola v polikristallicheskom zheleze i stali // Atomny'i mehanizm razrusheniia. - M.: Metallurgizdat, 1963. - S. 109-137.
9. Pisarenko G.S., Lebedev A.A. Deformirovanie i prochnost' materialov pri slozhnom napriazhennom sostoianii. - K.: Naukova dumka, 1976. - 415 s.

Статья рекомендована к публикации в журнале «Техническая наука», В.И. Большаковым и доктором техн. наук, Д.В. Лаухиным (Украина)