

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

Влияние прочности на охрупчиваемость сталей под действием концентраторов напряжений

В. Н. Грищенко, Ю. Я. Мешков, Ю. А. Полушкин, А. В. Шиян

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,
бульв. Акад. Вернадского, 36,
03680, ГСП, Киев, Украина*

В работе исследована связь прочности конструкционных сталей 40 и 30ХГСА с их охрупчиваемостью под действием кольцевых надрезов с радиусом 0,25 мм и 2 мм на цилиндрических образцах с начальным диаметром 8 мм. Параметр охрупчиваемости определялся как по изменению пластичности образца, так и по измерениям разницы между отношениями напряжений разрушения и текучести образцов до и после надреза. Показано, что, несмотря на почти пятикратное увеличение прочности сталей, параметр охрупчиваемости по прочностным показателям практически стабилен в интервале значений 0,3–0,4 и очень слабо зависит от остроты надреза. Эффект охрупчиваемости стали, измеряемый по потере пластичности от надреза, достигает 70–90% для высоких уровней прочности и существенно зависит от остроты надреза. Установлено, что резко выраженная охрупчивающая роль надрезов обуславливается, в первую очередь, фактором концентрации напряжений и, в меньшей мере, зависит от прочностных и пластических свойств сталей.

В роботі досліджено зв'язок міцності конструкційних сталей 40 та 30ХГСА з їхньою окрихчуваністю під дією кільцевих надрізів радіусом у 0,25 мм та 2 мм на циліндричних зразках діаметром у 8 мм. Параметер окрихчуваності визначається як за зміною пластичності зразка, так і за вимірами різниці між відношеннями напружень руйнування та плинності зразків до та після надрізу. Показано, що, незважаючи на майже п'ятиразове збільшення міцності сталей, параметер окрихчуваності за міцнісними показниками практично стабільний в інтервалі значень 0,3–0,4 та дуже слабо залежить від гостроти надрізу. Ефект окрихчуваності сталі, виміряний за втратою пластичності від надрізу, сягає 70–90% для високих рівнів міцності й істотно залежить від гостроти надрізу. Встановлено, що явно виражена окрихчувальна роля надрізів зумовлена, в першу чергу, фактором концентрації напружень і, меншою мірою, залежить від міцності та пластичності сталі.

The relationship between the strength of structural 40 and 30KhGSA steels and their susceptibility to embrittlement under the circular notches with radius of 0.25 mm and 2 mm is investigated on cylindrical specimens with an initial diameter of 8 mm. The parameter of susceptibility to embrittlement is determined by both changes in ductility of specimen and by measuring of difference in ratios of fracture stress to yield stress of specimens before and after notching. As shown, despite the almost fivefold increase in strength of steel, the parameter of susceptibility to embrittlement is really stable by strength characteristics over the range 0.3–0.4 and slightly depends on the notch sharpness. Effect of susceptibility to embrittlement of steel measured by steep decrease in ductility reaches 70–90% for high strength levels and significantly depends on the notch sharpness. As ascertained, the significant embrittlement effect of notches is caused by, first, the stress concentration factor and less depends on the strength and ductile properties of steels.

Ключевые слова: прочность, охрупчивание, охрупчиваемость, концентраторы напряжений, изломостойкость.

(Получено 22 января 2015 г.; окончат. вариант — 14 апреля 2015 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Неоднородности напряжённо-деформированного состояния (НДС) металла, создаваемые разного рода концентраторами напряжений (КН) (надрезы, трещины и т.п.) неизбежно ведут к потере механической надёжности изделий в связи с нарастанием угрозы их охрупчивания. При этом степень охрупчивающего влияния КН тесно связана с комплексом механических свойств сплавов и, в первую очередь, со свойствами прочности и пластичности. Поэтому постановка вопроса о сопоставлении степени охрупчиваемости, вызываемой факторами механического происхождения (неоднородности НДС) и факторами структурной природы (повышение прочности сплава) может представлять не только чисто научный, но и непосредственно практический интерес.

В предлагаемой работе ставилась задача установить закономерности изменения склонности к охрупчиванию сталей с разным уровнем прочности под воздействием надреза на цилиндрических образцах. Для изменения прочности сталей применялись различные виды подготовки структуры — от отжига до закалки и отпуска на разные температуры конструкционных сталей (КС) марок ст.40 и 30ХГСА.

Неоднородности НДС, создаваемые КН, оказывают заметное влияние не только на характеристики пластичности (в чем, собственно, заключается сам эффект охрупчивания), но и на показатели прочности надрезанного образца. Таким образом, эффект механического охрупчивания сплава, вызываемый действием КН, имеет

двойное проявление — пластическое и прочностное. Оба они заслуживают детального рассмотрения, так как каждый из них интересен как в научном, так и в практическом инженерном аспектах. С этой целью в работе анализировали изменение под воздействием КН как пластических, так и прочностных показателей исследуемых сталей. Эффект охрупчивания оценивали при помощи двух разных параметров Q_ψ и Q_{Br} :

$$Q_\psi = \frac{\Psi_K - \Psi_{NF}}{\Psi_K} = 1 - \frac{\Psi_{NF}}{\Psi_K}, \quad (1)$$

где Ψ_K — относительное сужение в момент разрыва цилиндрического образца при растяжении, Ψ_{NF} — то же для образца с изучаемым надрезом;

$$Q_{Br} = \frac{\frac{S_K - \sigma_{NF}}{\sigma_{0,2}}}{\frac{S_K}{\sigma_{0,2}}} = 1 - \frac{\sigma_{NF} \sigma_{0,2}}{\sigma_{GY} S_K}, \quad (2)$$

где S_K — истинное напряжение при разрыве образца без надреза, σ_{NF} — то же для образца с надрезом, $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести гладкого образца, σ_{GY} — напряжение общей текучести образца с надрезом.

Согласно (1), Q_ψ имеет смысл параметра охрупчиваемости по признаку потери свойства пластичности металла под действием КН. Величина Q_{Br} (2) есть мера того же эффекта, но измеряемого по признаку изменения соответствующих прочностных показателей интервала проявления пластичности металла до («дистанция» между $\sigma_{0,2}$ и S_K ; см. рис. 1) и после нанесения надреза (σ_{GY} и σ_{NF}).

Отношение

$$B_r = \frac{S_K}{\sigma_{0,2}} \quad (3)$$

можно рассматривать как показатель особого свойства — изломостойкости (B_r —break resistance) металла, а

$$B_{rNF} = \frac{\sigma_{NF}}{\sigma_{GY}} \quad (4)$$

как остаточную изломостойкость образца с надрезом.

Таким образом, параметр Q_{Br} (2) несёт информацию об охрупчивающем действии надреза в виде величины относительного изменения свойства изломостойкости. Поскольку характеристики B_r и B_{rNF} содержат информацию о ресурсе пластичности в показателях

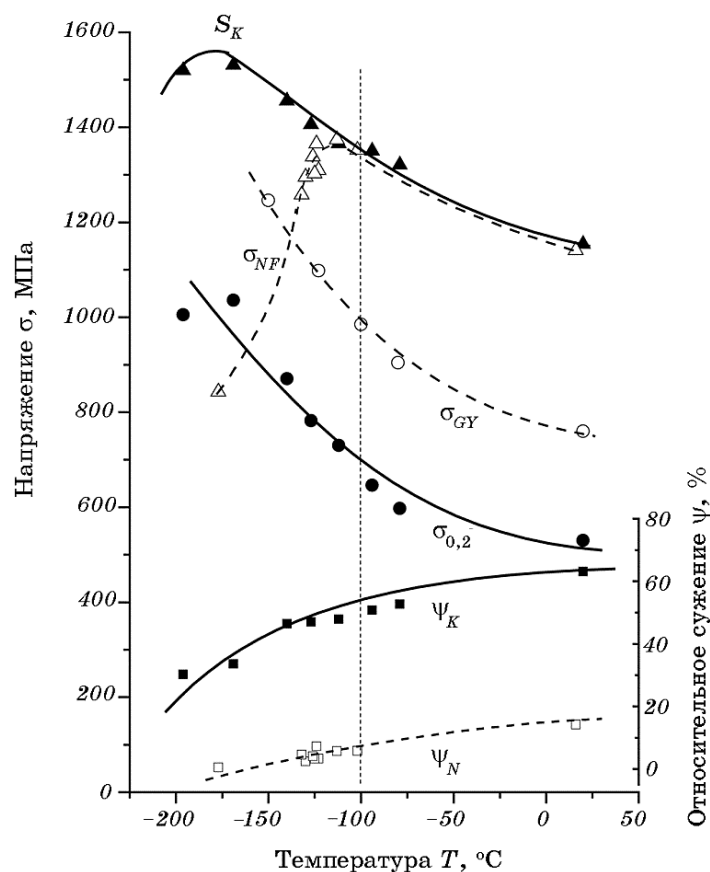


Рис. 1. Температурные зависимости механических характеристик стали 40 (нормализация 880°C). Маркеры представляют экспериментальные данные: \blacktriangle — S_K , \triangle — σ_{NF} , \bullet — $\sigma_{0.2}$, \circ — σ_{GY} , \blacksquare — ψ_K , \square — ψ_N .

прочности металла, то Q_{Br} также отражает эффект охрупчивания, но в аспекте, отличном от описания в традиционных показателях пластической деформации. При этом параметр Q_{Br} существенно дополняет параметр Q_ψ и поэтому заслуживает отдельного рассмотрения.

Рассмотрение вопроса о влиянии уровня прочности стали на степень охрупчивающего влияния КН в свете изменения параметров Q_ψ и Q_{Br} было целью настоящей работы.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования выполняли на конструкционных сталях двух марок — ст.40 и 30ХГСА, предварительно обработанных на формование

структур отжига, нормализации и закалки с отпуском, обеспечивающих получение широкого спектра прочностей сталей в интервале 370–1645 МПа, причём механические свойства оценивали при двух температурах испытания — комнатной (+20°C) и –100°C, что позволило дополнительно расширить диапазон уровней прочности исследуемых сталей.

Испытывали образцы двух типов — цилиндрические гладкие, диаметром 6 мм с рабочей базой 30 мм (6 штук), и образцы диаметром 8 мм, с кольцевым надрезом глубиной 1,4 мм с радиусом надреза $R = 0,25$ мм (КН типа К1) (11 штук). Для одного из вариантов закалённо-отпущенной стали 40 кроме того были изготовлены образцы с надрезом большего радиуса $R = 2$ мм (КН типа К2) (5 штук) с целью сравнительной оценки величины охрупчивающего эффекта, вызываемого действием чисто механического фактора НДС образца.

Испытания на растяжение выполняли на универсальной испытательной машине типа Instron 8802 при скорости перемещения траверсы 2 мм/мин. Для испытаний при пониженных температурах применяли специальную низкотемпературную камеру, обеспечивающую интервал температур механических испытаний от +20°C до температуры кипения азота (–196°C). По результатам испытаний определяли базовые механические характеристики прочности и пластичности гладких ($\sigma_{0,2}$, S_K , ψ_K) и надрезанных (σ_{GY} , σ_{NF} , ψ_N) образцов. При этом напряжение общей текучести образца с надрезом σ_{GY} определяли методом конечных элементов.

Пример температурных зависимостей механических характеристик, определённых при испытаниях гладких образцов и образцов с КН типа К1 для стали 40 (нормализация 880°C) приведён на рис. 1.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице приводятся основные результаты выполненного эксперимента, расположенные в порядке возрастания прочности $\sigma_{0,2}$ сталей от 370 до 1645 МПа независимо от температуры испытания $T_{исп}$. Позиции 1–12 в таблице относятся к результатам испытания образцов с КН типа К1 позиции 13–15 — с КН типа К2. Вариация свойства пластичности ψ_K исследованных сталей составляет интервал 47–63%, после нанесения надреза ψ_N уменьшается до уровня 2–16% (для КН типа К1). Из таблицы видно, что имеет место систематическое снижение показателя деформационного упрочнения n особенно интенсивное в области невысоких уровней прочности ($\sigma_{0,2} \cong 370–590$ МПа). Обращает на себя внимание тот факт, что параметр охрупчиваемости по показателю пластичности Q_ψ значительно выше (70–90%), чем параметр охрупчиваемости по изломостойкости Q_{Br} , который не превышает уровня 45–50%.

ТАБЛИЦА. Механические свойства и параметры охрупчиваемости сталей 40 и 30ХГСА.

№ пп	Сталь, обработка	$T_{\text{исп.}}$, °С	$\sigma_{0,2}$, МПа	ψ_K , %	ψ_N , %	n	B_r	B_{rNF}	Q_v	Q_{Br}	Тип КН	Вид по [3]
1	ст. 40, отжиг 880°С	20	370	55	15	0,28	3,4	1,84	0,74	0,46	1	1
2	30ХГСА, отжиг 920°С	20	373	54	12	0,19	3,35	2,25	0,78	0,33	1	1
3	ст. 40, нормализация 880°С	20	410	63	15	0,15	2,82	1,51	0,76	0,46	1	2
4	ст. 40, отжиг 880°С	-100	557	50	10	0,21	2,43	1,52	0,81	0,37	1	1
5	30ХГСА, отжиг 920°С	-100	580	46	2	0,15	2,45	1,29	0,95	0,47	1	1
6	ст. 40, нормализация 880°С	-100	590	53	8	0,16	2,19	1,37	0,85	0,37	1	2
7	ст. 40, зак. 880°С + отп. 380°С (1 ч)	20	780	62	16	0,11	2,37	1,72	0,74	0,27	1	2
8	ст. 40, зак. 880°С + отп. 380°С (1 ч)	-100	970	57	9	0,08	1,88	1,41	0,84	0,25	1	2
9	30ХГСА, зак. 880°С + отп. 520°С (1 ч)	20	970	62	9	0,06	1,89	1,42	0,85	0,25	1	2
10	30ХГСА, зак. 880°С + отп. 520°С (1 ч)	-100	1110	55	7	0,05	1,73	1,31	0,87	0,24	1	2
11	30ХГСА, зак. 880°С + отп. 300°С (0,5 ч)	20	1530	49	5	0,07	1,67	1,30	0,91	0,34	1	2
12	30ХГСА, зак. 880°С + отп. 300°С (0,5 ч)	-100	1640	49	2	0,05	1,56	1,00	0,96	0,35	1	2
13	ст. 40, зак. 880°С + отп. 400°С (1 ч)	20	1160	58	19	0,04	1,74	1,37	0,66	0,21	2	2
14	ст. 40, зак. 880°С + отп. 560°С (1 ч)	-100	1370	54	18	0,03	1,65	1,27	0,67	0,23	2	2
15	ст. 40, зак. 880°С + отп. 560°С (1 ч)	-175	1645	47	15	0,03	1,46	1,12	0,89	0,23	2	2

Таким образом, из эксперимента следует, что оценка эффекта механической охрупчиваемости от действия КН по признакам пластичности или прочности металла требует отдельного рассмотрения по каждому из параметров.

Из рисунка 2 видно, что увеличение уровня прочности стали ведёт к систематическому росту эффекта охрупчиваемости от надреза, причём острота КН типа К1 заметно усиливает этот эффект в сравнении с более «мягким» КН типа К2. Эффект охрупчиваемости по параметру Q_ψ весьма высок ($\cong 35\text{--}70\%$) и существенно различен для сталей 1 и 2 видов, различие между которыми обусловлено разным характером поведения зависимостей показателей пластичности от прочности, что подробно изложено в работе [1]. Заметим, что стали, относящиеся к виду 1, т.е. по сути обладающие большей пластичностью ψ_K при одинаковой прочности $\sigma_{0,2}$, с ростом прочности охрупчиваются от надреза сильнее, чем стали 2-го вида. Это вполне согласуется с тем, что стали 1-го вида, в отличие от сталей 2-го вида, резко снижают свою пластичность (ψ_K) в области прочностей, превышающих оптимальные, которым свойственны наибольшие значения ψ_K [1].

Более сложная зависимость от прочности наблюдается для пара-

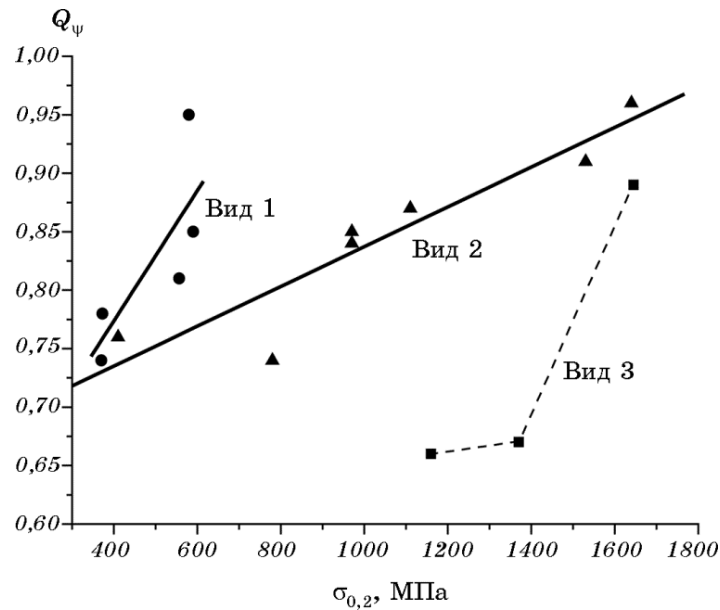


Рис. 2. Зависимости параметра охрупчиваемости по показателю пластичности Q_ψ от прочности $\sigma_{0,2}$ для КС. Экспериментальные данные для сплавов с КН: типа 1 (• — стали вида 1, ▲ — стали вида 2) и типа 2 (■ — стали вида 2).

метра охрупчиваемости по признаку потери изломостойкости Q_{Br} (2) (рис. 3). Прежде всего, отметим, что общий уровень параметра Q_{Br} намного меньше (примерно на 25–50%), чем уровень Q_{ψ} . Наличие минимума на кривой 1, рис. 3 означает, что кроме величины предела текучести $\sigma_{0,2}$ на величину Q_{Br} влияют и другие факторы. Рост охрупчиваемости Q_{Br} при высоких уровнях прочности ($\sigma_{0,2} > 1000$ – 1100 МПа) воспринимается вполне естественно, однако сильное снижение Q_{Br} в области низких прочностей сталей нуждается в более детальном рассмотрении. Охрупчивание сплава всегда означает потерю свойства пластичности, но механическое охрупчивание от КН кроме снижения пластичности (ψ_K) сопровождается также и заметным изменением прочностных показателей, что влечёт за собой изменение несущей способности элемента конструкции.

В связи с вышеуказанным, эффект механического охрупчивания требует двойного рассмотрения, как с позиций анализа пластичности (Q_{ψ}), так и прочности, т.е., в конечном счёте, рассмотрения изломостойкости B_r (Q_{Br}). Как следует из выполненных экспериментов, влияние фактора прочности ($\sigma_{0,2}$) стали на показатели Q_{ψ} и Q_{Br} радикально различается (ср. рис. 2 и 3). Если повышение показателя Q_{ψ} (рис. 2) выглядит вполне логичным, то снижение эффекта

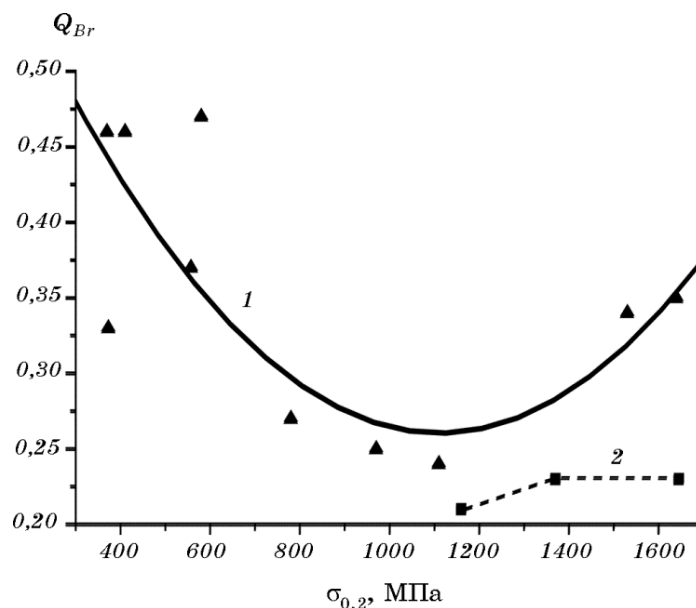


Рис. 3. Зависимости параметра охрупчиваемости по показателю изломостойкости Q_{Br} от прочности $\sigma_{0,2}$ для КС. Экспериментальные данные для сплавов с КН: \blacktriangle — типа 1 (кривая 1), \blacksquare — типа 2 (кривая 2).

охрупчиваемости от КН по признаку изломостойкости B_r требует своего объяснения.

Причина расхождения в закономерностях изменения Q_ψ и Q_{Br} кроется в различии физических смыслов измеряемых показателей свойств — пластичности ψ_K и изломостойкости B_r . Дело в том, что B_r согласно (3) своей величиной отражает не просто пластичность ψ_K в чистом виде, а пластичность в комплексе с показателем деформационного упрочнения n по Холлмону [2]. Это означает, что одинаковому показателю ψ_K могут соответствовать совершенно различные показатели $B_r = S_K/\sigma_{0,2}$ для материалов с различными величинами n , т.е. в рассмотрение различий в закономерностях изменения двух видов охрупчиваемости (Q_ψ и Q_{Br}) следует включить фактор деформационного упрочнения n (см. табл.). Из таблицы видно, что показатель n снижается по мере роста прочности стали, что отмечалось ранее в работе [3].

Поскольку n напрямую влияет на показатели B_r и B_{rNF} , а также на их разницу в (2), то с уменьшением n при возрастании $\sigma_{0,2}$ в интервале от 400 до 1000 МПа показатель охрупчиваемости Q_{Br} от надреза заметно снижается (от 0,45 до 0,25). Отмечаемое здесь различие в закономерностях влияния прочности для двух показателей охрупчиваемости свидетельствует о том, что показатели Q_ψ и Q_{Br} имеют существенно различный физический смысл, так как отражают различные аспекты эффекта охрупчивания стали КН.

Фактор большого деформационного упрочнения у сталей низкой прочности (см. табл.) сильнее влияет на исходную изломостойкость B_r , чем на остаточную (в образце с надрезом) B_{rNF} . Отсюда усиленный эффект чувствительности к КН (охрупчивание) для низкопрочных сталей, который с ростом прочности $\sigma_{0,2}$ постепенно снижается до уровня $Q_{Br} \cong 0,25$. Для сталей среднего уровня прочности ($\cong 800\text{--}1100$ МПа) отмечается самая низкая чувствительность к потере изломостойкости от действия КН, что само по себе представляет определённый инженерный интерес.

В сущности, это означает, что КС среднего уровня прочности являются оптимальными с точки зрения наименьшей чувствительности к охрупчивающему действию разного рода КН в стальных изделиях. Одной из причин этого является величина деформационного упрочнения стали, что наглядно представляется на рис. 4 в однозначной зависимости параметра Q_{Br} от показателя n . Принимая во внимание, что для обеспечения функции силовой надёжности изделия защита показателей прочности, т.е. несущей способности элемента конструкции (ЭК) более актуальна, чем забота о сохранении свойства пластичности под воздействием КН, можно признать, что в инженерном смысле параметр Q_{Br} выступает мерой своего рода «прочностной деградации» ЭК.

Тем самым подтверждается полезность и необходимость разделя-

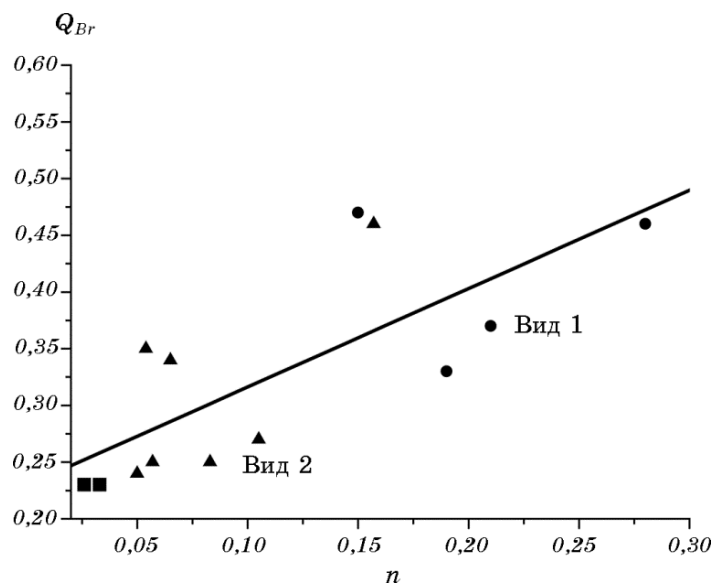


Рис. 4. Влияние показателя деформационного упрочнения n на эффект потери изломостойкости по параметру охрупчиваемости Q_{Br} под воздействием надреза для КС. Экспериментальные данные для сплавов с КН: типа 1 (● — стали вида 1, ▲ — стали вида 2) и типа 2 (■ — стали вида 2).

ного рассмотрения параметра Q_{Br} в сопоставлении с показателем охрупчиваемости Q_{ψ} для характеристики охрупчивания сталей под действием КН.

4. ВЫВОДЫ

1. Охрупчивающее действие концентраторов напряжений, отмечаемое по их влиянию на показатели пластичности (Q_{ψ}) и прочности (Q_{Br}) с изменением прочности стали $\sigma_{0,2}$ проявляется по-разному, что даёт основания различать эффект охрупчивания, как меру потери пластичности ψ_K (параметр Q_{ψ}), и эффект потери изломостойкости B_r (Q_{Br}). С увеличением прочности стали охрупчиваемость под воздействием надреза возрастает, причём более интенсивно для сталей 1-го вида, чем для менее пластичного 2-го вида. В то же время силовой показатель охрупчивания стали Q_{Br} , как мера потери изломостойкости B_r , имеет минимальный уровень у сталей среднего класса прочности (800–1000 МПа), что позволяет считать такие стали наименее чувствительными к такому вредному проявлению присутствия концентраторов, как потеря несущей способности изделия.

2. Установлено, что решающую роль для потери изломостойкости

изделия под воздействием концентраторов напряжений играет свойство деформационного упрочнения сталей — с увеличением показателя Холломона n мера потери изломостойкости Q_{Br} нарастает.

3. Использование показателей изломостойкости B_r и меры потери изломостойкости Q_{Br} существенно дополняет традиционную характеристику охрупчиваемости стали, измеряемую по величине пластической деформации в шейке Q_ψ , в части анализа и адекватной оценки эффективности влияния различного рода факторов охрупчивания в материаловедении и технике.

Авторы благодарят д-ра физ.-мат. наук, проф. С. А. Котречко за проявленный к работе интерес и полезные советы.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Шиян, С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, Е. Ф. Сорока, О. П. Носенко, И. С. Федорова, *Металлознавство та термічна обробка металів*, **1**, № 4: 12 (2013).
2. J. H. Hollomon, *Amer. Inst. Min. Metallurg. Eng.: Iron Steel Div.*, **162**: 268 (1945).
3. А. В. Шиян, *Металлофиз. новейшие технол.*, **33**, № 12: 1703 (2011).

REFERENCES

1. A. V. Shiyan, S. A. Kotrechko, Yu. Ya. Meshkov, E. F. Soroka, O. P. Nosenko, and I. S. Fedorova, *Metaloznavstvo ta Termichna Obrobka Metaliv*, **1**, No. 4: 12 (2013) (in Russian).
2. J. H. Hollomon, *Amer. Inst. Min. Metallurg. Eng.: Iron Steel Div.*, **162**: 268 (1945).
3. A. V. Shiyan, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **33**, No. 12: 1703 (2011) (in Russian).