

## **О ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СТЕПЕНИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СТАЛЕЙ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПРОКАТКИ К ТИПУ КОНЦЕНТРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ**

**В.П. Горбатенко, В.М. Дорохин, В.В. Бурховецкий, В.Г. Конарев,  
В.В. Горбатенко (ДонНТУ, Компания «Астра-Стайл»)**

*Установлено, что степень чувствительности высокопрочных строительных сталей контролируемой прокатки к типу концентратора напряжений существенно возрастает с понижением температуры динамических испытаний.*

Листы из низколегированных строительных сталей повышенной и высокой прочности для изготовления труб большого диаметра в настоящее время изготавливаются, как правило, методом контролируемой прокатки [1–3]. При этом стремятся обеспечить сочетание повышенной прочности и высокой вязкости и хладостойкости металла труб, для чего для сталей, микролегированных добавками ниобия, ванадия, титана, снижают температуру нагрева слэбов перед прокаткой [1, 2] и окончания деформации [1, 4]. Однако, если деформация осуществляется при температуре двухфазной области при преобладании феррита, может образовываться весьма неоднородная структура, следствием чего является заметное снижение стойкости к хрупкому разрушению и критической температуры. При этом усиливается анизотропия механических свойств, снижаются ударная вязкость во всех трех направлениях и относительное сужение по толщине, а склонность к расщеплению поверхности в направлении, параллельном плоскости проката, возрастает [1, 2, 5–7]. Количество расщеплений увеличивается с понижением температуры конца прокатки (особенно ниже 750 °С), а также температуры испытаний в области перехода от вязкого к хрупкому разрушению. Следовательно, можно ожидать существенного изменения показателей склонности таких сталей к хрупкому разрушению при изменении температурных условий испытаний.

Целью настоящих исследований является изучение характера изменения показателей ударной вязкости и различий в значениях этих показателей в случае разных типов концентратора напряжений для трубных сталей катего-

рий прочности К60 и Х70 в зависимости от температурных условий испытаний.

Исследования были выполнены на листах из сталей Х70 и 10Г2ФБ, химический состав которых приведен в таблице 1, а средние показатели механических свойств по результатам испытаний поперечных образцов - в таблице 2. Листы были произведены в условиях ОАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича» (сталь 10Г2ФБ) и ОАО «Металлургический комбинат «Азовсталь» (сталь Х70, состав №2). Для сравнения использовали листы импортной поставки (сталь Х70, состав №3).

Таблица 1 - Химический состав исследованных сталей, % масс.

№ состава	Марка стали	C	Mn	Si	S	P	Ti	Al	V	Nb	N <sub>2</sub>	Ca
1	10Г2ФБ	0,11	1,62	0,24	0,006	0,013	0,018	0,028	0,105	0,024	0,007	0,007
2	Х70	0,08	1,62	0,27	0,004	0,015	0,016	0,036	0,078	0,041	0,005	0,005
3	Х70	0,12	1,57	0,32	0,002	0,017	0,013	0,030	0,007	0,046	0,007	0,002

Таблица 2 - Средние значения показателей механических свойств исследованных сталей по результатам испытаний поперечных образцов

№ состава	Марка стали	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_2$ , %	KCV <sup>-20°C</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	KCU <sup>-60°C</sup> , Дж/см <sup>2</sup>
1	10Г2ФБ	668	568	36,0	138	156
2	Х70	615	545	40,0	224	222
3	Х70	597	494	39,0	289	322

Листы были прокатаны по технологии контролируемой прокатки, обеспечившей в данном случае получение уровня прочностных характеристик, соответствующего требованиям поставки по категории прочности К60 (см. табл. 2). Это позволяет проводить более убедительное сравнение показателей трещиностойкости сталей одного класса прочности в зависимости от условий испытаний. Кроме того, листы имели одинаковую толщину – 18,6 мм. Отбор проб для изготовления образцов производили из различных зон листов как по их длине (головная и срединная зоны раската),

их длине (головная и срединная зоны раската), так и по ширине (прикромочная зона, зоны, соответствующие  $1/3$  и  $1/2$  ширины листа), причем, из 2-3 листов данной партии. Таким образом, результаты, приведенные в таблице 2 и в последующих иллюстративных материалах, являются среднеарифметическими данными испытаний не менее 18 разрывных и 36 ударных образцов на «точку».

Выполненные микроструктурные исследования показали, что при общей определенной ориентированности структуры, характерной для всех трех сталей, сталь состава №1, прокатку листов из которой завершали при наиболее низкой температуре ( $710...715^{\circ}\text{C}$ ), характеризовалась наиболее высокой степенью развития структурной полосчатости. Минимальной степенью проявления структурной неоднородности отличалась сталь состава №3. Кроме того, в стали состава №3 наблюдали феррито-бейнито-перлитную структуру, в отличие от двух других сталей с феррито-перлитной структурой.

Соответственно, сталь состава №1 характеризуется значительно более высокими прочностными свойствами и более низкими показателями ударной вязкости в сравнении с двумя другими сталями. Минимальной прочностью и максимальной вязкостью характеризуется сталь состава №3. Сталь состава №2 занимает промежуточное положение как по показателям прочности, так и по характеристикам вязкости (см. табл. 2). Причем, листы из всех трех сталей полностью удовлетворяли требованиям нормативной и технической документации, обеспечивая при этом и заметный «запас» по показателям ударной вязкости при отрицательных температурах испытаний.

Для всех сталей показатели ударной вязкости, полученные при испытаниях продольных образцов, снижаются с понижением температуры испытаний значительно в меньшей степени, чем таковые, полученные при испытаниях поперечных образцов (рисунки 1 и 2). Показатели вязкости стали при испытаниях образцов с «мягким» концентратором напряжений оказываются менее чувствительными к изменению температуры испытаний в сравнении с таковыми, полученными при испытаниях образцов с «острым» концентратором напряжений. При этом показатели ударной вязкости, полученные на поперечных образцах, с понижением температуры испытаний могут снижаться столь значительно, что, например, существенное преимущество, которое имела сталь состава №3 в сравнении со сталью состава №2 при комнатной температуре, полностью исчезает при низких температурах испытаний (см. рис. 2). При этом показатели ударной вязкости при испытаниях продольных образцов оказываются заметно выше таковых в случае испытаний поперечных образцов.

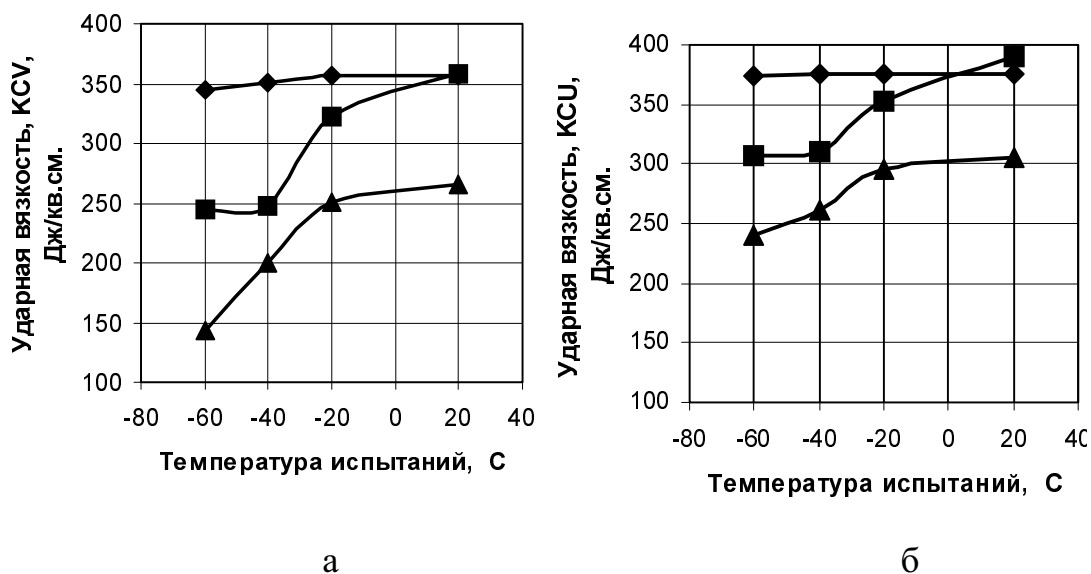


Рисунок 1 – Зависимость показателей ударной вязкости KCV (а) и KCU (б) сталей X 70 состава 3 (◆), X 70 состава 2 (■) и 10Г2ФБ состава 1 (▲) от температуры испытаний; результаты испытаний продольных образцов.

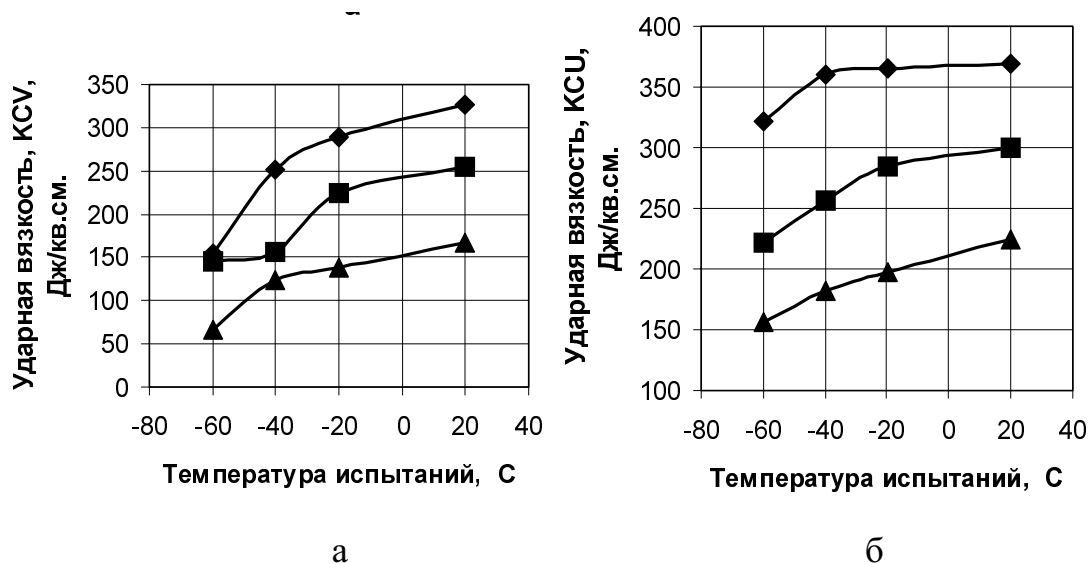


Рисунок 2 – Зависимость показателей ударной вязкости KCV (а) и KCU (б) для сталей X 70 состава 3 (◆), X 70 состава 2 (■) и 10Г2ФБ состава 1 (▲) от температуры испытаний; результаты испытаний поперечных образцов.

С целью получения дополнительных характеристик трещиностойкости сталей и изменения их чувствительности к концентраторам напряжений с понижением температуры испытаний или эксплуатации нами проведен анализ изменения разницы между значениями ударной вязкости стали при испытаниях образцов Шарпи и Менаже при данной температуре  $T_i$  ( $\Delta$ , Дж/см<sup>2</sup>):

$$\Delta = KCU_{T_i} - KCV_{T_i}; \text{ Дж/см}^2 \quad (1)$$

В физическом смысле величина  $\Delta$  представляет собой разницу в удельной работе разрушения образцов с разным типом концентраторов напряжения. Если принять допущение, что энергия развития трещины (и, соответственно, удельная работа развития трещины) не зависит от типа концентратора напряжений, то величину  $\Delta$  можно интерпретировать как разницу в удельной работе зарождения трещины в зависимости от типа концентратора напряжений, или, по крайней мере, как величину, прямо пропорциональную этой разнице.

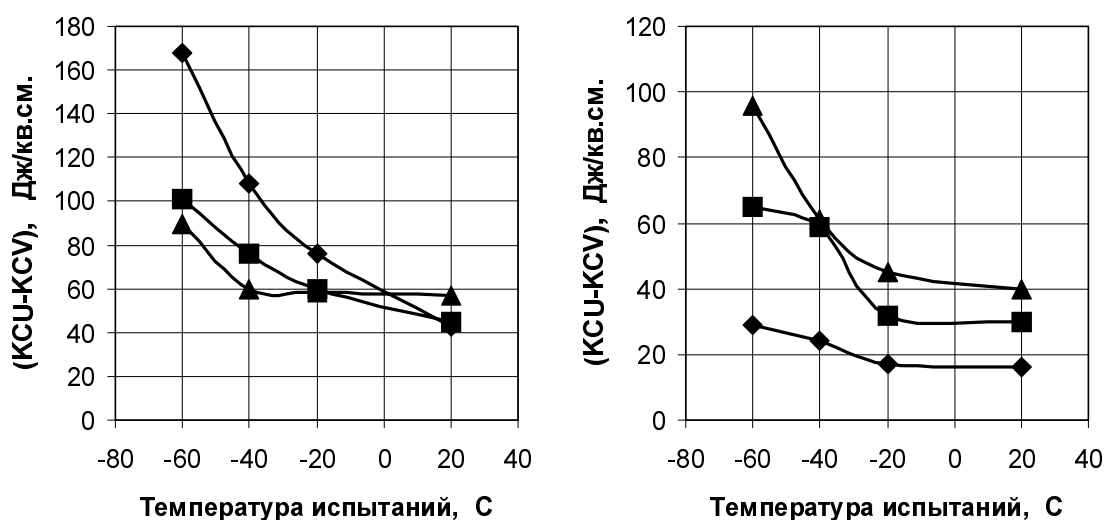
Исходя из такого подхода, можно полагать, что увеличение значения величины  $\Delta$  свидетельствует о росте чувствительности стали, обработанной по соответствующему режиму, к типу концентратора напряжений. Такой критерий можно использовать при сравнительном анализе сталей и оценке влияния параметров технологического процесса на показатели трещиностойкости металла. Анализ же характера изменения величины  $\Delta$  от температуры испытаний может служить дополнительным критерием «пригодности» стали для использования изделий из нее в сложных климатических условиях: чем меньшими окажутся различия в величине  $\Delta$  при испытаниях в заданном температурном интервале, тем в меньшей степени следует ожидать ускорения процессов зарождения трещин у концентраторов напряжений с понижением температуры эксплуатации изделий.

При оценке показателей трещиностойкости стали по результатам испытаний на ударный изгиб, в том числе и величины  $\Delta$ , следует учитывать и общий уровень ударной вязкости металла при соответствующей температуре испытаний. Это важно, прежде всего, при сравнительном анализе сталей и технологий производства листов и труб, поскольку, например, низкие значения  $\Delta$  могут быть получены и в случае общего низкого уровня показателей ударной вязкости стали, например, в условиях хрупкого или квазихрупкого разрушения.

Следовательно, можно полагать, что повышение разницы между показателями ударной вязкости стали на образцах с разным типом концентратора

напряжений ( $\Delta$ ) свидетельствует о возможном облегчении зарождения трещин у дефектов – потенциальных мест концентрации напряжений, увеличении чувствительности металла к концентраторам напряжений и, очевидно, может рассматриваться как косвенный показатель возможного повышения склонности металла к коррозионному растрескиванию под напряжением.

На рис. 3 приведены результаты, характеризующие изменение показателя  $\Delta$  от температуры испытаний с учетом направления вырезки образцов. Из анализа приведенных данных следует, что разница между показателями ударной вязкости при испытаниях образцов с разным типом концентратора напряжений ( $\Delta$ ) существенно возрастает с понижением температуры испытаний. Это свидетельствует о повышении чувствительности стали к концентраторам напряжений при пониженных температурах испытаний, что может быть одним из факторов, способствующих облегчению зарождения трещин, в том числе, очевидно, и трещин КРН, при отрицательных температурах.



а

б

Рисунок 3 – Изменение показателя  $\Delta=(KCU - KCV)$  для поперечных (а) и продольных (б) образцов в зависимости от температуры испытаний на ударный изгиб сталей X 70 состава 3 (◆), X 70 состава 2 (■) и 10Г2ФБ состава 1 (▲).

Обращает на себя внимание тот факт, что значения  $\Delta$  могут существенно различаться в зависимости от направления вырезки образцов, что свидетельствует о чувствительности этого параметра к возможному изменению характера структуры стали в направлении развития трещины. Причем, как следует

из анализа данных, приведенных на рисунках 1 - 3, не удается выявить закономерную связь между уровнем ударной вязкости и значениями  $\Delta$ . Так, в стали состава №3, характеризующейся максимальным уровнем показателей ударной вязкости и наименее выраженной структурной неоднородностью в микрообъемах, для поперечных образцов наблюдали наиболее интенсивный в сравнении с другими сталями рост значений  $\Delta$  с понижением температуры испытаний. В то же время при испытаниях продольных образцов величина  $\Delta$  характеризовалась заметно меньшими, чем у других сталей, значениями при всех температурах испытаний. Для стали состава №2 характерен меньший в сравнении со сталью состава №3 рост значений  $\Delta$  с понижением температуры испытаний поперечных образцов (см. рис. 3, а). Однако, в случае испытаний продольных образцов как общий уровень значений  $\Delta$ , так и прирост их с понижением температуры испытаний оказываются более значительными в сравнении со сталью состава №3 (см. рис. 3, б). При этом различия в степени возрастания величины  $\Delta$  с понижением температуры испытаний для образцов из стали состава №2, вырезанных в поперечном и продольном направлениях, оказались заметно меньшими, чем для стали состава №3. Еще меньшие различия в значениях  $\Delta$  для образцов, вырезанных в поперечном и продольном направлениях, получили для стали состава №1 (см. рис. 3). Причем, в случае испытаний поперечных образцов уровень значений  $\Delta$  при низких температурах у этой стали оказывается меньшим, чем у сталей составов №2 и №3.

Характер изменения величины  $\Delta$  от температуры испытаний для всех сталей весьма точно описывается зависимостью вида (2):

$$\Delta = A \times \exp [B \times (C - T)^2] ; \quad (2)$$

где  $\Delta = (KCU - KCV)$ , Дж/см<sup>2</sup>, для соответствующей температуры испытаний; T, °C; A, B, C – коэффициенты, постоянные для каждой марки стали.

В таблице 3 приведены значения коэффициентов и статистические характеристики таких уравнений для исследованных сталей.

Обсуждаемые различия в величине  $\Delta$ , как дополнительного критерия трещиностойкости металла, могут свидетельствовать о различиях в условиях зарождения и развития трещин не только в зависимости от положения поверхности разрушения по отношению к направлению прокатки листов, но и от температуры испытаний. В случае использования продольных образцов разрушение происходит в плоскости, пересекающей полосы перлита и феррита в направлении, перпендикулярном продольной оси листа (поперек полос). При использовании поперечных образцов разрушение происходит в плоско-

сти, пересекающей полосы феррита и перлита в направлении, параллельном этой оси (вдоль полос).

Таблица 3 - Значения коэффициентов и статистические характеристики уравнений вида (2) в зависимости от марки стали и направления вырезки образцов для испытаний

Характеристика	Поперечные образцы			Продольные образцы		
	Сталь 10Г2ФБ	Сталь Х-70	Сталь Х-70	Сталь 10Г2ФБ	Сталь Х-70	Сталь Х-70
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
Коэффициент А	55,5	42,0	31,4	38,8	68,0	14,5
Коэффициент В, $\times 10^6$	113,3	71,4	84,3	195,9	-67,2	37,7
Коэффициент С	5,5	51,0	81,0	8,0	86,0	76,0
Коэффициент корреляции	0,999	1,0	1,0	0,999	1,0	1,0
Максимальная относительная погрешность расчетов, %	0,46	0,25	0,02	0,50	0,07	0,05
Доверительный интервал, Дж/см <sup>2</sup>	0,20	0,10	0,02	0,15	0,02	0,01

Следует, однако, учитывать, что определения «вдоль полос» и «поперек полос» являются весьма условными, поскольку соотношение длины (размера в направлении длины листа) и ширины (размера в направлении ширины листа) этих полос определяются соотношением вытяжки и уширения листов при прокатке. В рассматриваемых случаях действующая технология производства листов обеспечивает более высокую степень течения металла в продольном направлении в сравнении с поперечным, поэтому следует ожидать большую длину таких полос вдоль оси листа, чем поперек ее.

Контролируемая прокатка толстых листов с деформацией в чистовой клети стана при пониженных температурах, реализуемая на предприятиях – поставщиках листов для труб магистральных газопроводов, предопределяет возникновение структурной неоднородности и текстуры деформации. Это является основной причиной возникновения анизотропии свойств сталей и тех особенностей изменения показателей их трещиностойкости, которые обсуждались выше.

Полученные данные могут свидетельствовать о том, что вероятность возникновения трещин и степень чувствительности материала труб к концентраторам напряжений могут изменяться в зависимости от направления в листах и, что особенно важно, от температуры испытаний или эксплуатации. С



учетом того, что высокопрочные трубные стали категорий прочности Х 70 и К 60 предназначены для использования в сложных климатических условиях, значительное изменение их чувствительности к концентраторам напряжений при низких температурах и большое различие в показателях трещиностойкости для образцов, вырезанных в разных по отношению к оси листа направлениях, представляется весьма нежелательным.

Исходя из результатов выполненного анализа, можно считать, что сталь Х70 импортного производства при отрицательных температурах эксплуатации, несмотря на весьма высокий уровень показателей ударной вязкости, может не иметь преимуществ по показателям трещиностойкости в сравнении со сталями производства Мариупольских металлургических комбинатов. Более того, при температурах ниже  $-40^{\circ}\text{C}$  эта сталь может заметно уступать двум другим в отношении надежности и степени чувствительности к концентраторам напряжений.

Следует учитывать, что наибольшие изменения в величине различий в показателях ударной вязкости для образцов с разным типом концентратора напряжений в зависимости от температуры испытаний фиксировали для поперечных образцов, для которых плоскость разрушения оказывается перпендикулярной плоскости листа и параллельной его продольной оси. Это же направление является преобладающим для формирования магистральных трещин, в том числе и трещин КРН, в трубопроводах, сваренных из прямошовных труб. Следовательно, можно полагать, что обсуждаемые различия в показателях свойств и трещиностойкости сталей в разных направлениях, особенно при пониженных температурах, могут рассматриваться в качестве одной из причин ориентированного формирования магистральных трещин в трубопроводах, хотя для подтверждения этого предположения необходимо проведение углубленных исследований.

В результате выполненных исследований установлено, что для высокопрочных строительных сталей контролируемой прокатки различия в значениях показателей ударной вязкости для образцов с разным типом концентратора напряжений существенно возрастают с понижением температуры испытаний, что может свидетельствовать о повышении чувствительности сталей к наличию и типу концентраторов напряжений. Эти различия оказываются более значительными при испытаниях поперечных образцов, что может быть одной из причин преимущественного образования продольных трещин в магистральных трубопроводах.

### **Перечень ссылок**

1. Матросов Ю.И., Литвиненко Д.А., Голованенко С.А. Сталь для магистральных газопроводов.– М.: Металлургия.– 1989.- 288 с.
2. Гюнтер Э. Контролируемая прокатка толстого листа. // М.– 1981. (Обзор по системе “Информсталь”) ин-т “Черметинформация”.– Вып. 14 (107), 57 с.
3. Разработка и технологический процесс производства трубных сталей в XXI веке / Ю.Д. Морозов, Ю.И. Матросов, А.С. Болотов и др. //Сталь.– 2001.–№ 4.–С. 58–62.
4. 4. Разработка высокопрочных сталей для труб классов X-70 - X-100. / Отани Х., Хашимото Т., Икеда А. И и др. // В кн.: Стали для газопроводных труб и фиттингов. Труды конференции / Под ред. А.В.Рудченко. М.: Металлургия.– 1985.– С. 153-169.
5. Оценка анизотропии механических свойств и трещиностойкости листов и труб большого диаметра / В.М.Дорохин, В.П.Горбатенко, Ю.Д.Морозов и др. // Сталь.– 2001.– № 1.– С.65-69.
6. Влияние небольших содержаний фосфора на эксплуатационные свойства мелкозернистых конструкционных сталей и сталей для магистральных трубопроводов / Фрайер К., Флосдорф Ф.-И., Хауман В., Хеллер Т. // Черные металлы.– 1991, № 1.– С. 15–22.
7. Нотт Дж. Ф. Зависимость ударной вязкости от микроструктуры. // В кн.: Стали для газопроводных труб и фиттингов. Труды конференции./ Под ред. А.В.Рудченко.– М.:Металлургия.– 1985.– С. 90-108.

**© Горбатенко В.П., Дорохин В.М., Бурховецкий В.В.,  
Конарев В.Г., Горбатенко В.В. 2005**