

## Надежность материалов энерготехнологического назначения при эксплуатации в Северных регионах России

Каргинова В.В., д.т.н., проф. Ермаков Б.С.

Санкт-Петербургский государственный университет  
низкотемпературных и пищевых технологий

*Одной из наиболее повреждаемых групп оборудования, эксплуатируемого в условиях климатического холода, является вспомогательное энерготехнологическое оборудование, изготавливаемое из углеродистых сталей марок 10 и 20 по ГОСТ 1050-88. Эти стали используются при производстве паро-, газо- и водопроводов технологических линий, бойлеров, ресиверов, корпусов фильтров, сосудов и топливных емкостей. Подобное оборудование не задействовано напрямую в технологической цепочке основного производства, а обслуживает ее потребности (по сжатому воздуху, пару, холодной и горячей воде, топливу и т. п., как, например, межцеховые паропроводы) и обычно монтируется на открытом воздухе, температура которого в северных регионах страны в зимние месяцы может опускаться ниже  $-60^{\circ}\text{C}$ .*

Ключевые слова: энерготехнологическое назначение, надежность и эксплуатация материалов.

Одной из наиболее повреждаемых групп оборудования, эксплуатируемого в условиях климатического холода, является вспомогательное энерготехнологическое оборудование, изготавливаемое из углеродистых сталей марок 10 и 20 по ГОСТ 1050-88. Эти стали используются при производстве паро-, газо- и водопроводов технологических линий, бойлеров, ресиверов, корпусов фильтров, сосудов и топливных емкостей. Подобное оборудование не задействовано напрямую в технологической цепочке основного производства, а обслуживает ее потребности (по сжатому воздуху, пару, холодной и горячей воде, топливу и т.п., как, например, межцеховые паропроводы) и обычно монтируется на открытом воздухе, температура которого в северных регионах страны в зимние месяцы может опускаться ниже  $-60^{\circ}\text{C}$ . Это значительно ниже минимально разрешенной температуры применения для данной группы материалов, которая Правилами РТН РФ ограничена уровнем в  $-40^{\circ}\text{C}$ . Во время холодного пуска, такое оборудование подвергается динамическому нагружению (газо- или гидродинамическим ударам) имея температуру металла равную температуре окружающей среды

Эксплуатационные температуры оборудования достигают  $340-370^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, за температурный режим эксплуатации вспомогательного энергетического оборудования следует принимать диапазон от  $-65^{\circ}\text{C}$  до  $+370^{\circ}\text{C}$ . Срок службы оборудования на ряде предприятий нефте- и газодобывающей промышленности, расположенных в северных районах, уже превзошел расчетный ресурс, составляющий, согласно Правилам устройства и безопасной эксплуатации РТН РФ на соответствующие группы оборудования – 100 тыс. ч.

Анализ повреждаемости этого оборудования в северных регионах страны свидетельствует, что надежность его эксплуатации в зимние месяцы в 3 – 6 раз ниже, чем в иные времена года, а повышенный уровень аварийности, в первую очередь, обусловлен возникновением и развитием хрупких трещин в зонах термического влияния монтажных ремонтных сварных соединений.

В табл. 1 приведены данные об ударной вязкости и работе развития трещины металла вырезок из элементов вспомогательного энерготехнологического оборудования, отработавшего расчетный срок службы. В качестве базового свойства, определяющего работоспособность металла оборудования в режиме динамического нагружения при холодном пуске была выбрана ударная вязкость сталей. В работе были использованы образцы для испытаний на сопротивление хрупкому разрушению, которое оценивали по удельной работе развития трещины  $KCT_{\delta}$ .

Как видно из приведенных в табл.1 данных разрушение металла оборудования связано с потерей запасов пластичности и вязкости, что приводит к развитию зернограницных хрупких трещин. Эти трещины распространяются, в основном, по границам наследственных аустенитных зерен, твердый раствор которых обогащен сегрегациями примесных атомов, в первую очередь сегрегацией наиболее опасной примеси – атомами фосфора. Развитие фосфорных сегрегаций в таком оборудовании связано с особенностями его эксплуатации, а именно наличием кратковременных технологических разогревов до температур свыше  $400^{\circ}\text{C}$ , проведением ремонтных, в частности, сварочных работ, когда температура металла в зоне термического влияния сварного шва превышает 400-градусный рубеж.

Таблица 1. Механические свойства металла вырезок из оборудования.

Вид оборудования	Марка стали	Параметры эксплуатации		Т окр. ср., $^{\circ}\text{C}$	Ударная вязкость KCV, МДж/м <sup>2</sup> , при температуре Т, $^{\circ}\text{C}$			Ударная вязкость KCV, МДж/м <sup>2</sup> , при температуре Т, $^{\circ}\text{C}$		
		Т, $^{\circ}\text{C}$	τ, т. час		20	-40	-60	20	-40	-60
Паропровод бурой установки	10	245	252	- 58	1,12	0,44	0,14	0,66	0,18	0,06
Верхний барабан котла ДКВР-4/13 (буровая установка)	20	250	252	- 58	1,14	0,37	0,19	0,53	0,14	0,03
Межцеховой паропровод	20	340	145	- 49	1,05	0,33	0,16	0,51	0,12	0,06
Топливная магистраль	20	$\pm 20$ 140	$\frac{262}{0,5}$	- 65	0,75	0,24	0,14	0,37	0,09	0,06
Сосуд давления (паросборник) технологической линии	20	370	130	- 61	0,62	0,14	0,12	0,31	0,08	0,05

Известна однозначная взаимосвязь между интенсивностью развития зернограницных сегрегаций вредных примесей, размером зерен углеродистых сталей, их хладостойкостью, прочностными и вязкими свойствами, условиями зарождения и развития как вязкой, так и хрупкой трещины.

В работе были проанализированы пути повышения эксплуатационной надежности энерготехнологического оборудования эксплуатируемого в условиях Крайнего Севера. Это может быть достигнуто уменьшением размеров зерен сталей путем микролегирования их ванадием и ниобием пределах растворимости этих элементов в твердом растворе, а также заменой традиционной термической обработки – нормализации на термоциклическую обработку. В табл.2. приведены данные о фактических размерах зерен сталей после введения микролегирующих добавок и выполнения режима ТЦО. Результаты исследований свойств сталей приведены в табл. 3 и на рис.1 (см. приложение 1). Как следует из приведенных результатов главенствующим фактором в снижении температуры вязко-хрупкого перехода является размер зерна. Причем роль размера зерен усиливается по мере уменьшения его средних значений в стали.

Так при уменьшении среднего размера зерен с 80 до 40 мкм переходная температура вязко-хрупкого перехода понижается всего на 15-20 градусов, у сталей легированных ванадием и ниобием на 12-16 градусов. При большей степени измельчения – уменьшения размеров зерен от 40 до 6-8 мкм понижение  $T_{хр}$  у углеродистых сталей составило 55-60 градусов, у сталей с ванадием и ниобием – около 90 градусов, понижение тем интенсивнее, чем меньше диаметры зерен у сравниваемых сталей. Влияние микролегирования должно рассматриваться только в контексте их роли в уменьшении размеров действительного зерна углеродистых сталей.

Таблица 2. Влияние режима термической обработки и микролегирования на размер зерен.

Режим термической обработки	Марка стали, средний диаметр зерна (мкм)			
	10*	20*	20Ф	20Б
Состояние поставки (нормализация с прокатного нагрева)	85 – 70	88 – 75	65 – 50**	58 – 50
Нормализация 900 °С, 1 час охлаждение на воздухе	80 – 60	79 – 55	55 – 40	55 – 35
Нормализация 900 °С, 1 час, охлаждение в струе воздуха $v \sim 10$ м/с	70 – 42	68 – 50	51 – 26	45 – 21
Термоциклическая обработка по режиму Гомогенизация при 1100 °С – 2 ч + 4-кратное ТЦО в межкритическом интервале	34 – 18**	31 – 21	14 – 8	15 – 7

с охлаждением на воздухе – 1, 3 и 4 циклов и в воде после 2-го цикла				
--	--	--	--	--

\* средние данные по материалам различных плавов: для стали 20 – 21 плавка, сталь 20 – 22 плавки, сталь 20Ф – 11 и сталь 20Б -7 плавов;

\*\* Для дополнительного измельчения зерен в стали 10 и 20 до 10-6 мкм последнее охлаждение при ТЦО – в воду. Для увеличения размеров зерна в сталях 20Ф и 20Б до 80-85 мкм использовался режим, включающий в себя комбинированное охлаждение – до 400 °С в печи, затем – охлаждение на воздухе.

Следует подчеркнуть, что при одинаковых размерах зерен микролегирование не только не понижает, а даже повышает  $T_{xp}$ . Так при 80 мкм  $T_{xp}$  стали 10 – 274 К, стали 20 – 282 К, 20Ф – 288 и 20Б – 287 К. Такой эффект может быть объяснен увеличением напряжения трения в уравнении Коттрелла-Петча и связан с легированием и, как следствие, увеличением числа дефектов в твердом растворе стали.

Таким образом, положительный эффект микролегирования стали ванадием и ниобием достигается не за счет их положительного влияния на свойства твердого раствора стали, а только за счет дополнительно измельчения размеров зерен, когда после одного и того же режима термической обработки углеродистой стали и стали, легированной этими элементами размеры зерен значительно понижаются (табл. 2).

Таблица 3. Влияние микролегирования и термической обработки на трещиностойкость и механические свойства углеродистых сталей.

№	Режим термической обработки	Сталь	Механические свойства				Балл аустенита	$\Sigma_{прим}^{2)}$ (ат. %)
			$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$\delta_5$	$K_{Ic}^{293K}$ <sub>3)</sub>		
			МПа		%	МПа·м <sup>1/2</sup>		
1	Нагрев 900 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе	20	485	270	19	48	5	24,3
		20Ф-1 <sup>3)</sup>	610	410	28	51	8	16,0
		20Ф-2	590	360	33	54	7–8	16,2
		20Б	610	375	31	54	7	16,8
		20Г	600	370	30	55	7–8	16,6
2	Нагрев 940 °С, выдержка 2 ч, охлаждение в воде + отпуск при 600 °С – 1 ч	20	473	251	14	60	–	19,4
3	Гомогенизация при 1100°С – 2 ч + режим 2	20	525	280	23	54	–	17,0

4	Гомогенизация при	20	563	351	24	70	9-10	11,6
	1100 °С – 2 ч + 4-	20ФЛ-2	640	460	28	74	12	8,8
	кратное ТЦО в межкри-	20БЛ	625	430	29	76	11–12	9,1
	стическом интервале с	20ФЛ-1	640	470	26	69	11	9,0
	охлаждением на возду-	20ТЛ	655	480	28	74	12	9,1
хе – 1, 3 и 4 циклов и в								
воде после 2-го цикла <sup>1)</sup>								

<sup>1)</sup> Режим, принятый на ОАО «Ижорские заводы»

<sup>2)</sup> Содержание примесных атомов в слое толщиной 10 Å

<sup>3)</sup> 20ФЛ-1 (0,15 % V), 20ФЛ-2 (0,12 % V). Содержание Nb – 0,06 %; Mo – 0,15 %, Ti – 0,03 %

Таким образом, на основании приведенных исследований представляется возможным констатировать факт, что ведущую роль в формировании эксплуатационных свойств стали будут играть мероприятия направленные на измельчение зерен стали. Снижение размеров зерен повышает температуру вязко-хрупкого перехода, повышает трещиностойкость и предел текучести, а следовательно и выносливость сталей. Микролегирование углеродистых сталей ванадием и ниобием, как фактор дополнительного измельчения зерен, необходимо признать благоприятным повышением работоспособности стали в климатических условиях Сибири и Крайнего Севера.

Взаимосвязь механических свойств сталей, их переходной температуры хрупкости и трещиностойкости с размерами зерен, по нашему мнению, должна быть объяснена с позиции степени загрязненности границ зерен сталей примесными элементами. В табл. 3 приведены данные о степени загрязненности границ примесями, в первую очередь фосфором, в зависимости от размеров зерен. Как следует из данных табл. 3 суммарное содержание примесей в границах зерен ( $\Sigma_{\text{прим}}$ ), приходящееся на единицу площади границ, уменьшается по мере увеличения общей площади границ зерен; эквидистентно с уменьшением  $\Sigma_{\text{прим}}$  растет величина трещиностойкости, понижается температура вязко-хрупкого перехода, топография поверхностей разрушения образцов сталей смещается в сторону более вязких форм ямочного отрыва.

Основным способом сборки конструкций из углеродистых сталей является сварка. Известно, что наиболее опасными зонами, т.е. зонами максимального охрупчивания у этих материалов, являются те области зоны термического влияния, которые в процессе сварки были нагреты до температур 250-300 °С. Возникающие в таких областях термические напряжения могут привести к деформационному старению и, как следствие, охрупчиванию конструкции, повышению переходной температуры вязко-хрупкого перехода сварного соединения, по сравнению с  $T_{\text{хр}}$  основного металла.

Деформационное старение – имитация зоны термических остаточных напряжений была создана путем одноосного статического растяжения образцов сталей нагретых до 250-300 °С. Величина пластической деформации образцов в ходе нагрева составила 10 %. Скорость растяжения образца составила 314 % в час.

Известно, что деформационное старение должно повышать предел текучести стали, смещает вязко-хрупкого перехода в сторону положительных температур. Результаты исследований свойств сталей показаны на рис. 2, а в табл. 4 и 5 приведены уравнения регрессии зависимости температуры вязко-хрупкого перехода и изменения предела текучести в сталях от размера зерен.

Таблица 4. Взаимосвязь размеров зерен углеродистых сталей с пределом текучести в условиях деформационного старения.

Марка стали	Уравнение регрессии	Число точек	Стандартное отклонение
10	$\sigma_{0,2} = 364,7 + 16,7 d^{-1/2}$	14	14,3
20	$\sigma_{0,2} = 392,2 + 15,3 d^{-1/2}$	12	12,6
20Ф	$\sigma_{0,2} = 384,8 + 22,8 d^{-1/2}$	11	11,7
20Б	$\sigma_{0,2} = 381,7 + 20,6 d^{-1/2}$	7	14,9

Как следует из результатов опытов по изменению предела текучести в условиях деформационного старения - в сталях наблюдается прирост величины этой характеристики, по отношению к недеформированному состоянию, причем интенсивность этого приращения увеличивается по мере уменьшения размеров зерен.

Таблица 5. Взаимосвязь размеров зерен углеродистых сталей с переходной температурой вязко-хрупкого перехода в условиях деформационного старения.

Марка стали	Уравнение регрессии	Число точек	Стандартное отклонение
10	$T_{xp} = 410 - 44,9 \ln d^{-1/2}$	14	14,3
20	$T_{xp} = 426 - 48,7 \ln d^{-1/2}$	12	12,6
20Ф	$T_{xp} = 451,7 - 74,1 \ln d^{-1/2}$	11	11,7
20Б	$T_{xp} = 460,2 - 79,4 \ln d^{-1/2}$	7	14,9

Так для сталей 10 и 20 величина  $\Delta\sigma_{0,2}^{10}$  (при среднем размере зерен 80 мкм) составила 230-250 МПа, при  $d = 10$  мкм – 270-290 МПа. Еще более резкие изменения  $\Delta\sigma_{0,2}$  отмечены для сталей легированных ванадием и ниобием:  $\Delta\sigma_{0,2}^{80} - 240-260$  МПа,  $\Delta\sigma_{0,2}^{10} - 310-320$  МПа.

## Приложение 1

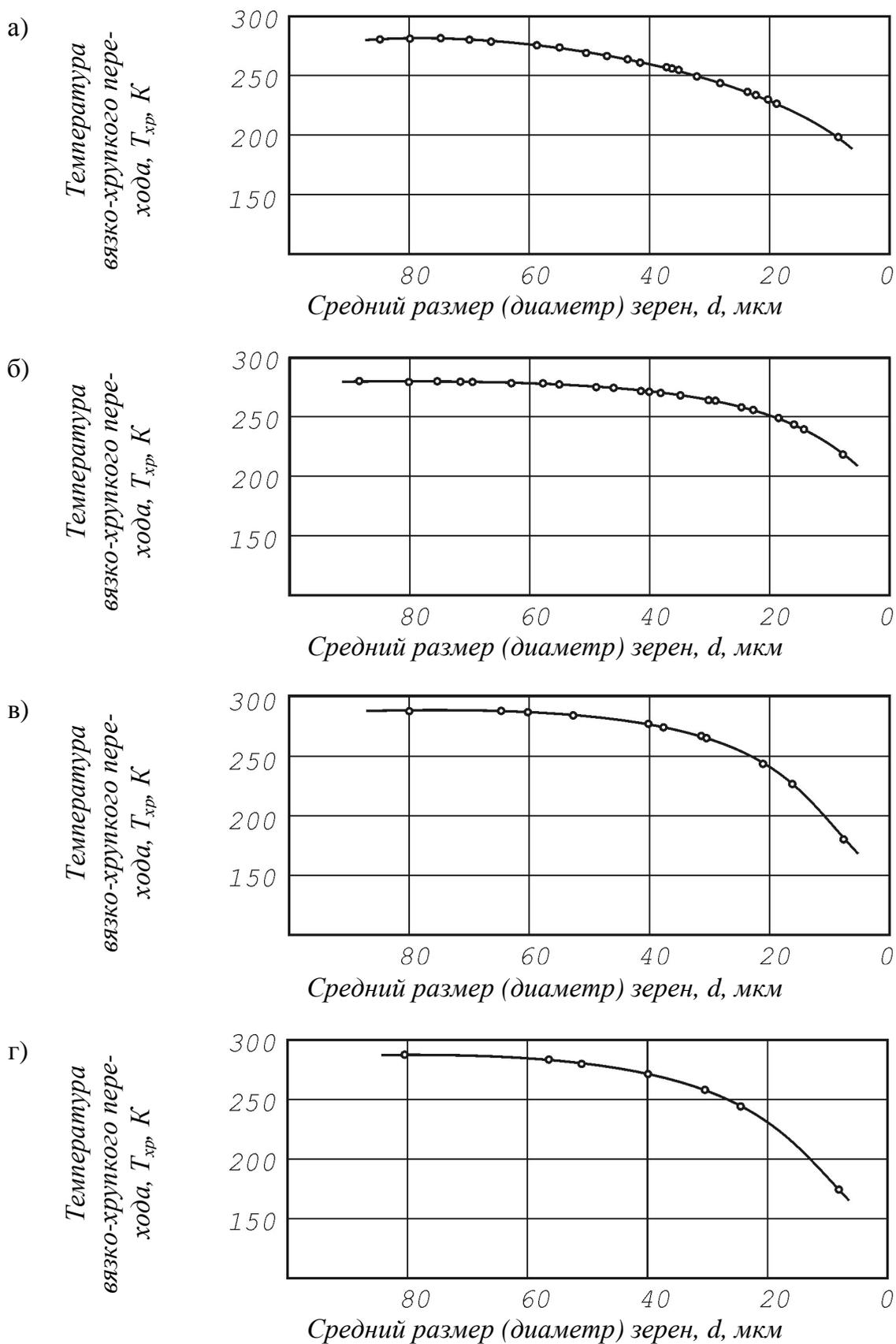


Рис.1 Влияние среднего размера зерен на переходную температуру вязко-хрупкого перехода

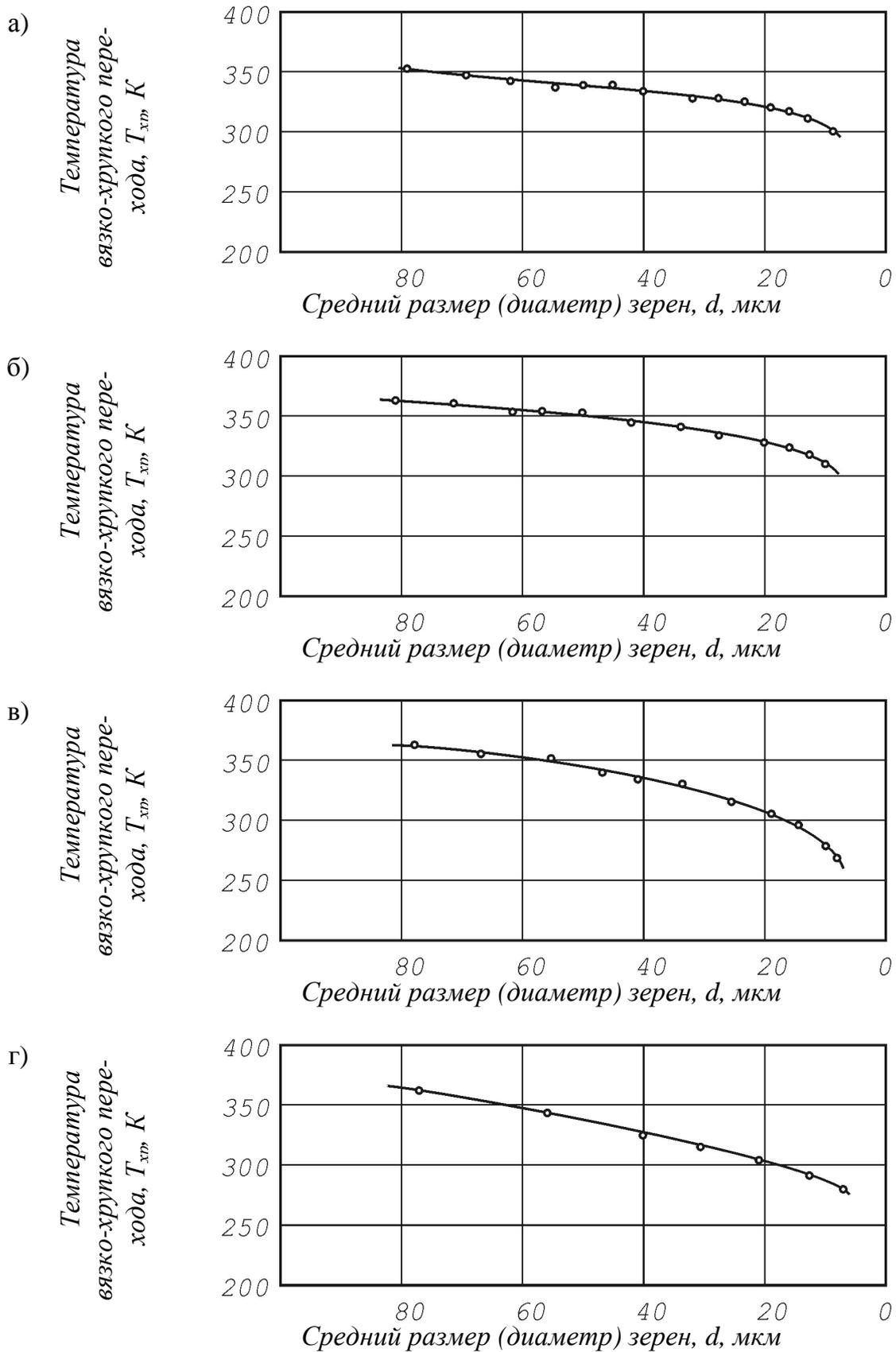


Рис. 2 Влияние размеров зерен на переходную температуру хрупко-вязкого перехода сталей после деформационного старения:  
 а) – сталь 10; б) – сталь 20; в) – сталь 20Ф; г) – сталь 20Б.