

УДК 621.039.53

М.И. Ершова, Л.Т. Крюков

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОХРУПЧИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ РЕАКТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты использования параметров микропластической деформации для оценки охрупчивания сталей при радиационном воздействии на металлические конструкции во время эксплуатации реакторных установок. Проведены исследования на предмет предотвращения охрупчивания путем проведения циклической гомогенизации с измельчением аустенитного зерна и значительным снижением микронеоднородности распределения хрома и никеля в твердом растворе. Благодаря применению параметров микропластической деформации, установлена чувствительность мартенситностареющих сталей к обратимой отпускной хрупкости. Исследованы методы повышения радиационной стойкости сталей посредством подавления обратимой отпускной хрупкости. Установлено сходство процессов при развитии обратимой отпускной хрупкости и радиационном охрупчивании сталей. Сделаны выводы о способах моделирования радиационного воздействия на стали путем инициирования развития обратимой отпускной хрупкости.

*Ключевые слова:* реакторная установка, ЯЭУ, радиационное воздействие, параметры микропластической деформации, ударная вязкость, охрупчивание сталей, обратимая отпускная хрупкость.

Для обеспечения высокой эксплуатационной надежности и безопасности ответственных конструкций ЯЭУ сталь должна обладать высокой стойкостью к эксплуатационной повреждаемости структуры за весь период функционирования реакторной установки и соответствовать определенным требованиям прочности, пластичности, сопротивления хрупкому разрушению, циклической трещиностойкости, радиационной стойкости. В связи с этим, для обеспечения надежной работы и безопасной эксплуатации реакторного оборудования актуально проведение исследований на предмет охрупчивания сталей.

Целью работы является установление зависимости между процессами охрупчивания сталей, связанными с развитием обратимой и необратимой отпускной хрупкости и изменением параметров микропластической деформации в условиях радиационного облучения.

В данной работе поставлены следующие задачи:

- оценить охрупчивание сталей в результате радиационного воздействия по параметрам микропластической деформации;
- изучить факторы, влияющие на предотвращение развития обратимой отпускной хрупкости;
- исследовать возможность повышения радиационной стойкости стали в результате подавления обратимой отпускной хрупкости;
- провести анализ способов определения критической температуры хрупкости с целью изучения перехода стали в хрупкое состояние, а также динамики и условий зарождения и развития хрупкой трещины.

Под хрупкостью в данной работе понимается свойство материалов разрушаться под действием внешних сил без остаточных деформаций.

Исследование различных видов хрупкого разрушения сталей, показало, что параметры микропластической деформации целесообразно использовать для оценки процесса охрупчивания, рассматривая изменение параметра  $A = \frac{(\Delta\sigma_2^s)^2}{\sigma_2^s}$ , где  $\sigma_2^s$  – значения верх-

ней границы области минимальных необратимых пластических деформаций,  $\Delta\sigma_2^0$  – интенсивность деформаций. Параметр  $A$  характеризует склонность к хрупкому разрушению стали, определяется при очень малых деформациях и не зависит от конкретно реализуемого способа разрушения материала [1].

Различные относительные изменения значений КСУ (ударной вязкости) и  $A$  при охрупчивании сталей можно проиллюстрировать на примере обратимой отпускной хрупкости. При проведении исследования образцы сталей после высокого отпуска (650 °С) с целью получения «вязкого» состояния охлаждались в воде, для получения «хрупкого» состояния обрабатывались по режимам, приведенным в табл. 1. Охрупчивание сталей оценивалось по отношению  $КСУ/КСУ_x$  и  $A/A_x$ , где КСУ и  $A$  – значения параметров для «вязкого» состояния, а  $КСУ_x$  и  $A_x$  – соответствующие величины для каждой из охрупчивающих обработок.

Таблица 1

Влияние охрупчивающих обработок сталей на относительное изменение параметров КСУ и  $A$

Охрупчивающая обработка, отпуск	Параметр оценки охрупчивания	Марка стали							
		37ХН3А	40Х	45Г2	18Х2Н4МА				5ХНТ
					А	Б	В	Г	
1. 650 °С, 1 час, охлаждение 2. с печью	$\frac{КСУ}{КСУ_x}$	1,74	1,00 [1,35]	1,26	1,11	1,15	1,05	0,97	1,04
	$\frac{A}{A_x}$	1,35	1,48	1,20	1,07	1,13	1,07	0,94	0,95
2. 650 °С, 1 час, охлаждение в воде +525 °С, 5 часов, охлаждение на воздухе	$\frac{КСУ}{КСУ_x}$	1,90	1,01 [1,16]	1,25	1,17	1,12	1,04	0,99	1,02
	$\frac{A}{A_x}$	1,73	1,51	1,20	1,14	1,10	1,06	0,96	1,01

Как следует из табл. 1, для всех сталей, кроме стали 40Х, оба оценочных параметра ( $КСУ/КСУ_x$  и  $A/A_x$ ) показали качественно одинаковые результаты: стали 37ХН3А, 45Г2 имеют существенную склонность к обратимой отпускной хрупкости; сталь 18Х2Н4МА (А, Б, В) имеет незначительную склонность к обратимой отпускной хрупкости; а стали 18Х2Н4МА (Г) и 5ХНТ – не охрупчиваются. Следует отметить, что относительное изменение ударной вязкости стали 37ХН3А после обеих охрупчивающих обработок больше, чем параметра  $A$ , а для других марок сталей эти величины примерно равны. Это означает, что для всех приведенных марок сталей (кроме 40Х) охрупчивание стали может быть установлено по любому из использованных параметров оценки.

Особое место в ряду исследованных марок сталей занимает сталь 40Х, широко используемая в атомной промышленности, содержащая 0,84 % Cr. Это содержание хрома является граничным, ниже которого стандартные ударные испытания не обнаруживают развития обратимой отпускной хрупкости, а выше – фиксируют ее. Как следует из табл. 1, по относительному изменению КСУ сталь 40Х не подвержена обратимой отпускной хрупкости, в то время как параметр  $A$  при обеих охрупчивающих обработках уменьшается примерно в 1,5 раза, указывая на существенное развитие охрупчивающих процессов.

Для проверки этого положения была повышена «жесткость» напряженного состояния образцов при испытании на ударный изгиб путем уменьшения ширины надреза с 2 мм до 0,25 мм, в результате чего «удельная» работа разрушения образцов снизилась в 1,35 и 1,16 раза после соответствующих охрупчивающих обработок 1 и 2. Эти результаты приведены в табл. 1 в квадратных скобках. Следовательно, в случае стали 40Х, оценка ее охрупчи-

вания по параметрам микропластической деформации оказалась более объективной, чем по изменению КСУ при стандартных испытаниях. Таким образом, при использовании параметров микропластической деформации в качестве индикатора охрупчивания, была установлена чувствительность к обратимой отпускной хрупкости некоторых мартенситностареющих сталей, считавшихся не чувствительными к этому виду хрупкости.

Сталь 18Х2Н4МА используется для изготовления ответственных деталей ЯЭУ, трубопроводов, опор трубопроводов, сепараторов-пароперегревателей, комплектующих к ним и другого оборудования. Рассмотрим поведение параметров КСУ/КСУХ и А/АХ для стали 18Х2Н4МА (с точки зрения оценки ее склонности к обратимой отпускной хрупкости) при измельчении величины зерна и уменьшении химической микронеоднородности матрицы. В этом случае оба оценочных параметра дают близкие по величине результаты. Как следует из табл. 1, наибольшей склонностью к обратимой отпускной хрупкости обладает литая сталь 18Х2Н4МА (состояние Б), а также горячедеформированная сталь (состояние А). Проведение для литой стали циклической гомогенизации при 1050 °С (состояние В) делает сталь 18Х2Н4МА практически не склонной к обратимой отпускной хрупкости, а после циклической гомогенизации при 1250°С (состояние Г) «охрупчивающие» обработки даже несколько увеличивают вязкость стали по сравнению с «вязким» состоянием – после охлаждения в воде (КСУ/КСУХ и А/АХ).

Таким образом, предотвращение развития обратимой отпускной хрупкости в стали 18Х2Н4МА в результате проведения циклической гомогенизации связано с измельчением аустенитного зерна и значительным снижением микронеоднородности распределения хрома и никеля в твердом растворе [2]. Кроме того, такая обработка значительно повышает радиационную стойкость литой стали 18Х2Н4МА, что, наряду с имеющимися в литературе указаниями [3], подтверждает схожесть процессов при развитии обратимой отпускной хрупкости и при радиационном охрупчивании сталей. Это обстоятельство может позволить при разработке методов оценки свойств облученных материалов моделировать радиационное воздействие инициированием развития обратимой отпускной хрупкости, а также использовать методы подавления обратимой отпускной хрупкости для повышения радиационной стойкости сталей.

Сопоставление температурных зависимостей КСУ(Т) и А(Т) для всех испытанных сталей показывает, что обе зависимости имеют пороговый характер (рис. 1 и 2). Особенностью кривых А(Т) является то, что для наименее прочных (малоуглеродистых) сталей при повышении температуры от (-20 °С) до +20 °С отмечается снижение параметра А, в то время как величина КСУ остается практически постоянной. Такое снижение параметра А может быть объяснено протеканием деформационного старения при статической деформации, интенсивность которого уменьшается с понижением температуры. Этот эффект проявляется наиболее сильно в образцах армко-железа и почти не заметен в сталях с большим содержанием углерода, что связано с более высокой плотностью структурных дефектов в сталях, связывающих частично атомы внедрения и ослабляющих тем самым интенсивность деформационного старения [4].

Близость кривых температурных зависимостей КСУ(Т) и А(Т) позволила оценить наличие корреляции между параметрами КСУ и А. Результаты оценки приведены в табл. 2. Как следует из таблицы, во всех случаях, исключая сталь 45 и армко-железо с отпуском при 650 °С, между указанными параметрами имеется достаточно четкая линейная корреляция.

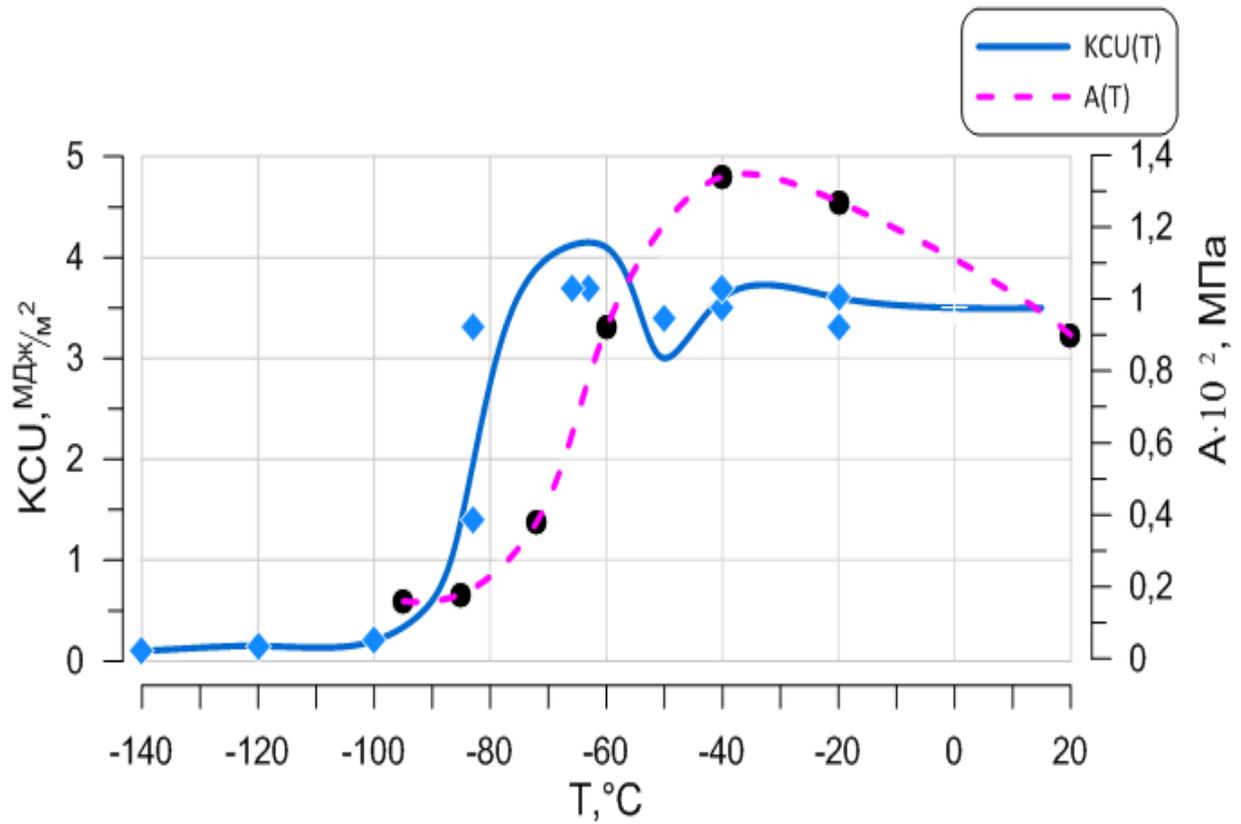


Рис. 1. Зависимость KCU (T) и A (T) армко-железа при отпуске 450 °C

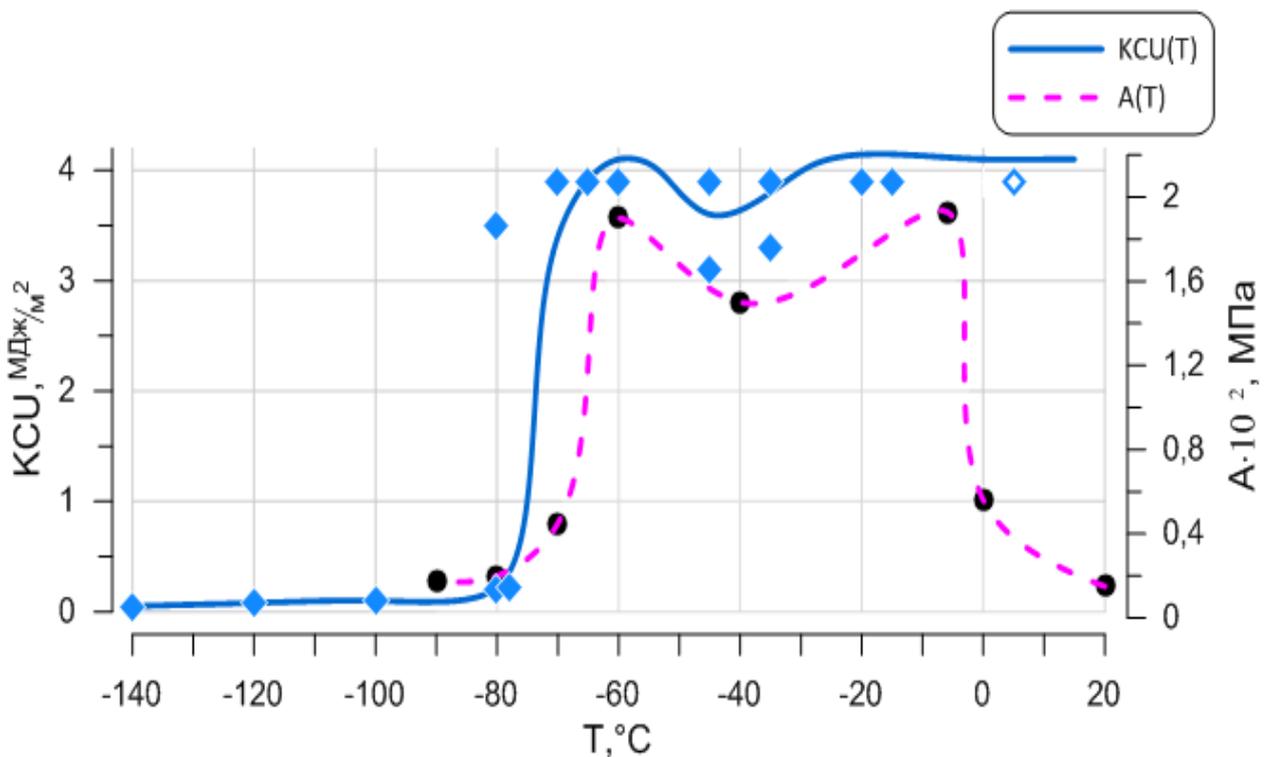


Рис. 2. Зависимость KCU (T) и A (T) армко-железа при отпуске 650 °C



Таблица 2

## Значение ударной вязкости (X) и параметра A (Y) для сталей

Марка стали (температура отпуска)	Параметры	Уравнение регрессии								Коэффициент корреляции «r»	
		X	X	X	X	X	X	X	X		Y
Армко-Fe (450°C)	X	3,5	3,6	3,6	3,0	0,6	0,2	-	-	$Y = 0,02 + 0,29 \cdot X$	0,84
	Y	1,27	1,34	0,92	0,38	0,18	1,6	-	-		
Армко-Fe (650°C)	X	3,9	3,9	3,6	0,39	2,4	0,1	0,1	-	$Y = 0,64 + 0,16 \cdot X$	0,37
	Y	0,56	1,93	1,5	1,9	0,45	0,2	0,18	-		
20 (300°C)	X	2,45	2,54	2,55	2,5	2,0	1,55	1,37	0,8	$Y = 0,05 + 0,09 \cdot X$	0,78
	Y	0,31	0,31	0,27	0,23	0,17	0,28	0,16	0,1		
20 (450°C)	X	2,55	2,54	2,53	2,43	2,33	2,3	2,2	1,5	$Y = 0,27 + 0,25 \cdot X$	0,99
	Y	0,38	0,37	0,4	0,37	0,326	0,32	0,318	0,12		
45 (300°C)	X	0,8	0,56	0,54	0,52	0,33	0,36	-	-	$Y = 0,13 + 0,43 \cdot X$	0,48
	Y	0,425	0,36	0,6	0,29	0,34	0,14	-	-		
45 (450°C)	X	0,78	0,65	0,58	0,29	0,45	0,25	0,15	-	$Y = 0,39 + 0,88 \cdot X$	0,36
	Y	0,38	1,87	1,18	0,9	0,27	0,56	0,37	-		
У8 (550°C)	X	0,17	0,13	0,13	0,15	0,11	0,08	-	-	$Y = -0,06 + 1,85 \cdot X$	0,93
	Y	0,24	0,2	0,15	0,24	0,14	0,07	-	-		
У8 (650°C)	X	0,34	0,27	0,12	0,12	0,11	0,05	-	-	$Y = 0,22 + 2,01 \cdot X$	0,94
	Y	0,99	0,61	0,45	0,51	0,49	0,20	-	-		
У10 (550°C)	X	0,19	0,08	0,07	0,05	0,03	0,03	0,02	-	$Y = 0,11 + 1,19 \cdot X$	0,98
	Y	0,35	0,23	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15	-		
У10 (650°C)	X	0,25	0,12	0,06	0,05	0,03	0,03	0,02	-	$Y = 0,16 + 2,08 \cdot X$	0,96
	Y	0,67	0,4	0,35	0,34	0,19	0,18	0,16	-		

Таблица 3

## Значения ударной вязкости (X) и параметра А (Y) для сталей и титановых сплавов

Марка стали	Параметры	Значения ударной вязкости (X) и параметра А (Y)										Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции «г»																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
45	X	0,25	0,17	0,27	0,31	0,49	0,61	0,73	0,85	1,11	1,41	$Y = 0,51 + 0,91 \cdot X$	0,96																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Y	0,88	0,76	0,53	0,75	0,87	1,02	1,11	1,41	1,46	1,79			У8	X	0,17	0,27	0,24	0,36	0,37	0,30	0,41	0,55	0,56	-	$Y = 0,71 + 4,11 \cdot X$	0,94	Y	0,47	0,67	0,52	0,68	0,82	1,03	0,99	1,18	1,58	-	У10	X	0,22	0,30	0,28	0,27	0,30	0,37	0,44	0,46	0,55	0,62	$Y = 0,44 + 3,55 \cdot X$	0,98	Y	0,40	0,40	0,50	0,56	0,74	0,87	1,08	1,25	1,59	1,70	30ХГСА	X	0,56	0,55	0,45	0,47	0,65	0,79	0,72	0,77	1,77	1,80	$Y = 0,17 + 0,27 \cdot X$	0,95	Y	0,32	0,25	0,28	0,30	0,43	0,42	0,32	0,64	0,64	0,65	40X	X	1,02	1,15	1,06	0,82	0,95	1,24	1,18	1,13	1,40	-	$Y = 0,66 + 0,99 \cdot X$	0,69	Y	0,24	0,35	0,31	0,27	0,28	0,40	0,35	0,78	0,90	-	15X2HMA	X	0,74	0,73	0,74	0,82	0,82	0,93	1,05	1,77	-	-	$Y = 3,67 + 1,56 \cdot X$	0,71	Y	0,91	0,97	0,97	0,98	0,98	1,06	1,04	1,60	-	-	5XHT	X	0,16	0,27	0,39	0,41	0,54	0,75	0,92	0,77	-	-	$Y = 0,13 + 0,5 \cdot X$	0,92	Y	0,24	0,35	0,27	0,30	0,37	0,50	0,68	0,47	-	-	18X2H4MA (A)	X	1,35	1,26	0,62	0,43	0,35	0,52	1,77	1,79	-	-	$Y = 0,87 + 0,23 \cdot X$	0,82	Y	1,28	1,05	0,98	0,90	0,96	1,11	1,17	1,41	-	-	18X2H4MA (Б)	X	1,28	1,06	1,02	0,79	0,86	1,11	1,38	1,72	-	-	$Y = 0,2 + 0,65 \cdot X$	0,96	Y	1,08	0,96	0,91	0,66	0,77	0,87	1,03	1,33	-	-	18X2H4MA (B)	X	1,21	0,82	0,84	0,73	0,81	0,97	1,19	1,58	-	-	$Y = 0,33 + 0,75 \cdot X$	0,95	Y	1,36	1,00	0,93	0,89	0,89	0,95	1,27	1,45	-	-	18X2H4MA (Г)	X	1,10	0,90	0,85	0,78	0,82	1,11	1,37	1,66	-	-	$Y = 0,26 + 0,56 \cdot X$	0,95	Y	0,81	0,73	0,81	0,74	0,69	0,91	0,97	1,25	-	-	X19H2Г5Т	X	0,20	0,20	0,36	1,60	1,80	-	-	-	-	-	$Y = 0,97 + 0,46 \cdot X$	0,90	Y	1,20	0,80	1,24	1,83	1,67	-	-	-	-	-	BT3-1	X	0,48	0,21	0,17	0,18	0,18	0,25	-	-	-	-	$Y = 0,55 + 1,4 \cdot X$	0,98	Y	1,21	0,87	0,78	0,75	0,75	0,92	-	-	-	-	BT22	X	0,32	0,17	0,22	0,28	-	-	-	-	-	-	$Y = 2,23 \cdot X$	0,99	Y	0,71	0,38	0,49	0,63	-	-	-
У8	X	0,17	0,27	0,24	0,36	0,37	0,30	0,41	0,55	0,56	-	$Y = 0,71 + 4,11 \cdot X$	0,94																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Y	0,47	0,67	0,52	0,68	0,82	1,03	0,99	1,18	1,58	-			У10	X	0,22	0,30	0,28	0,27	0,30	0,37	0,44	0,46	0,55	0,62	$Y = 0,44 + 3,55 \cdot X$	0,98	Y	0,40	0,40	0,50	0,56	0,74	0,87	1,08	1,25	1,59	1,70	30ХГСА	X	0,56	0,55	0,45	0,47	0,65	0,79	0,72	0,77	1,77	1,80	$Y = 0,17 + 0,27 \cdot X$	0,95	Y	0,32	0,25	0,28	0,30	0,43	0,42	0,32	0,64	0,64	0,65	40X	X	1,02	1,15	1,06	0,82	0,95	1,24	1,18	1,13	1,40	-	$Y = 0,66 + 0,99 \cdot X$	0,69	Y	0,24	0,35	0,31	0,27	0,28	0,40	0,35	0,78	0,90	-	15X2HMA	X	0,74	0,73	0,74	0,82	0,82	0,93	1,05	1,77	-	-	$Y = 3,67 + 1,56 \cdot X$	0,71	Y	0,91	0,97	0,97	0,98	0,98	1,06	1,04	1,60	-	-	5XHT	X	0,16	0,27	0,39	0,41	0,54	0,75	0,92	0,77	-	-	$Y = 0,13 + 0,5 \cdot X$	0,92	Y	0,24	0,35	0,27	0,30	0,37	0,50	0,68	0,47	-	-	18X2H4MA (A)	X	1,35	1,26	0,62	0,43	0,35	0,52	1,77	1,79	-	-	$Y = 0,87 + 0,23 \cdot X$	0,82	Y	1,28	1,05	0,98	0,90	0,96	1,11	1,17	1,41	-	-	18X2H4MA (Б)	X	1,28	1,06	1,02	0,79	0,86	1,11	1,38	1,72	-	-	$Y = 0,2 + 0,65 \cdot X$	0,96	Y	1,08	0,96	0,91	0,66	0,77	0,87	1,03	1,33	-	-	18X2H4MA (B)	X	1,21	0,82	0,84	0,73	0,81	0,97	1,19	1,58	-	-	$Y = 0,33 + 0,75 \cdot X$	0,95	Y	1,36	1,00	0,93	0,89	0,89	0,95	1,27	1,45	-	-	18X2H4MA (Г)	X	1,10	0,90	0,85	0,78	0,82	1,11	1,37	1,66	-	-	$Y = 0,26 + 0,56 \cdot X$	0,95	Y	0,81	0,73	0,81	0,74	0,69	0,91	0,97	1,25	-	-	X19H2Г5Т	X	0,20	0,20	0,36	1,60	1,80	-	-	-	-	-	$Y = 0,97 + 0,46 \cdot X$	0,90	Y	1,20	0,80	1,24	1,83	1,67	-	-	-	-	-	BT3-1	X	0,48	0,21	0,17	0,18	0,18	0,25	-	-	-	-	$Y = 0,55 + 1,4 \cdot X$	0,98	Y	1,21	0,87	0,78	0,75	0,75	0,92	-	-	-	-	BT22	X	0,32	0,17	0,22	0,28	-	-	-	-	-	-	$Y = 2,23 \cdot X$	0,99	Y	0,71	0,38	0,49	0,63	-	-	-	-	-	-																						
У10	X	0,22	0,30	0,28	0,27	0,30	0,37	0,44	0,46	0,55	0,62	$Y = 0,44 + 3,55 \cdot X$	0,98																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Y	0,40	0,40	0,50	0,56	0,74	0,87	1,08	1,25	1,59	1,70			30ХГСА	X	0,56	0,55	0,45	0,47	0,65	0,79	0,72	0,77	1,77	1,80	$Y = 0,17 + 0,27 \cdot X$	0,95	Y	0,32	0,25	0,28	0,30	0,43	0,42	0,32	0,64	0,64	0,65	40X	X	1,02	1,15	1,06	0,82	0,95	1,24	1,18	1,13	1,40	-	$Y = 0,66 + 0,99 \cdot X$	0,69	Y	0,24	0,35	0,31	0,27	0,28	0,40	0,35	0,78	0,90	-	15X2HMA	X	0,74	0,73	0,74	0,82	0,82	0,93	1,05	1,77	-	-	$Y = 3,67 + 1,56 \cdot X$	0,71	Y	0,91	0,97	0,97	0,98	0,98	1,06	1,04	1,60	-	-	5XHT	X	0,16	0,27	0,39	0,41	0,54	0,75	0,92	0,77	-	-	$Y = 0,13 + 0,5 \cdot X$	0,92	Y	0,24	0,35	0,27	0,30	0,37	0,50	0,68	0,47	-	-	18X2H4MA (A)	X	1,35	1,26	0,62	0,43	0,35	0,52	1,77	1,79	-	-	$Y = 0,87 + 0,23 \cdot X$	0,82	Y	1,28	1,05	0,98	0,90	0,96	1,11	1,17	1,41	-	-	18X2H4MA (Б)	X	1,28	1,06	1,02	0,79	0,86	1,11	1,38	1,72	-	-	$Y = 0,2 + 0,65 \cdot X$	0,96	Y	1,08	0,96	0,91	0,66	0,77	0,87	1,03	1,33	-	-	18X2H4MA (B)	X	1,21	0,82	0,84	0,73	0,81	0,97	1,19	1,58	-	-	$Y = 0,33 + 0,75 \cdot X$	0,95	Y	1,36	1,00	0,93	0,89	0,89	0,95	1,27	1,45	-	-	18X2H4MA (Г)	X	1,10	0,90	0,85	0,78	0,82	1,11	1,37	1,66	-	-	$Y = 0,26 + 0,56 \cdot X$	0,95	Y	0,81	0,73	0,81	0,74	0,69	0,91	0,97	1,25	-	-	X19H2Г5Т	X	0,20	0,20	0,36	1,60	1,80	-	-	-	-	-	$Y = 0,97 + 0,46 \cdot X$	0,90	Y	1,20	0,80	1,24	1,83	1,67	-	-	-	-	-	BT3-1	X	0,48	0,21	0,17	0,18	0,18	0,25	-	-	-	-	$Y = 0,55 + 1,4 \cdot X$	0,98	Y	1,21	0,87	0,78	0,75	0,75	0,92	-	-	-	-	BT22	X	0,32	0,17	0,22	0,28	-	-	-	-	-	-	$Y = 2,23 \cdot X$	0,99	Y	0,71	0,38	0,49	0,63	-	-	-	-	-	-																																															
30ХГСА	X	0,56	0,55	0,45	0,47	0,65	0,79	0,72	0,77	1,77	1,80	$Y = 0,17 + 0,27 \cdot X$	0,95																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Y	0,32	0,25	0,28	0,30	0,43	0,42	0,32	0,64	0,64	0,65			40X	X	1,02	1,15	1,06	0,82	0,95	1,24	1,18	1,13	1,40	-	$Y = 0,66 + 0,99 \cdot X$	0,69	Y	0,24	0,35	0,31	0,27	0,28	0,40	0,35	0,78	0,90	-	15X2HMA	X	0,74	0,73	0,74	0,82	0,82	0,93	1,05	1,77	-	-	$Y = 3,67 + 1,56 \cdot X$	0,71	Y	0,91	0,97	0,97	0,98	0,98	1,06	1,04	1,60	-	-	5XHT	X	0,16	0,27	0,39	0,41	0,54	0,75	0,92	0,77	-	-	$Y = 0,13 + 0,5 \cdot X$	0,92	Y	0,24	0,35	0,27	0,30	0,37	0,50	0,68	0,47	-	-	18X2H4MA (A)	X	1,35	1,26	0,62	0,43	0,35	0,52	1,77	1,79	-	-	$Y = 0,87 + 0,23 \cdot X$	0,82	Y	1,28	1,05	0,98	0,90	0,96	1,11	1,17	1,41	-	-	18X2H4MA (Б)	X	1,28	1,06	1,02	0,79	0,86	1,11	1,38	1,72	-	-	$Y = 0,2 + 0,65 \cdot X$	0,96	Y	1,08	0,96	0,91	0,66	0,77	0,87	1,03	1,33	-	-	18X2H4MA (B)	X	1,21	0,82	0,84	0,73	0,81	0,97	1,19	1,58	-	-	$Y = 0,33 + 0,75 \cdot X$	0,95	Y	1,36	1,00	0,93	0,89	0,89	0,95	1,27	1,45	-	-	18X2H4MA (Г)	X	1,10	0,90	0,85	0,78	0,82	1,11	1,37	1,66	-	-	$Y = 0,26 + 0,56 \cdot X$	0,95	Y	0,81	0,73	0,81	0,74	0,69	0,91	0,97	1,25	-	-	X19H2Г5Т	X	0,20	0,20	0,36	1,60	1,80	-	-	-	-	-	$Y = 0,97 + 0,46 \cdot X$	0,90	Y	1,20	0,80	1,24	1,83	1,67	-	-	-	-	-	BT3-1	X	0,48	0,21	0,17	0,18	0,18	0,25	-	-	-	-	$Y = 0,55 + 1,4 \cdot X$	0,98	Y	1,21	0,87	0,78	0,75	0,75	0,92	-	-	-	-	BT22	X	0,32	0,17	0,22	0,28	-	-	-	-	-	-	$Y = 2,23 \cdot X$	0,99	Y	0,71	0,38	0,49	0,63	-	-	-	-	-	-																																																																								
40X	X	1,02	1,15	1,06	0,82	0,95	1,24	1,18	1,13	1,40	-	$Y = 0,66 + 0,99 \cdot X$	0,69																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Y	0,24	0,35	0,31	0,27	0,28	0,40	0,35	0,78	0,90	-			15X2HMA	X	0,74	0,73	0,74	0,82	0,82	0,93	1,05	1,77	-	-	$Y = 3,67 + 1,56 \cdot X$	0,71	Y	0,91	0,97	0,97	0,98	0,98	1,06	1,04	1,60	-	-	5XHT	X	0,16	0,27	0,39	0,41	0,54	0,75	0,92	0,77	-	-	$Y = 0,13 + 0,5 \cdot X$	0,92	Y	0,24	0,35	0,27	0,30	0,37	0,50	0,68	0,47	-	-	18X2H4MA (A)	X	1,35	1,26	0,62	0,43	0,35	0,52	1,77	1,79	-	-	$Y = 0,87 + 0,23 \cdot X$	0,82	Y	1,28	1,05	0,98	0,90	0,96	1,11	1,17	1,41	-	-	18X2H4MA (Б)	X	1,28	1,06	1,02	0,79	0,86	1,11	1,38	1,72	-	-	$Y = 0,2 + 0,65 \cdot X$	0,96	Y	1,08	0,96	0,91	0,66	0,77	0,87	1,03	1,33	-	-	18X2H4MA (B)	X	1,21	0,82	0,84	0,73	0,81	0,97	1,19	1,58	-	-	$Y = 0,33 + 0,75 \cdot X$	0,95	Y	1,36	1,00	0,93	0,89	0,89	0,95	1,27	1,45	-	-	18X2H4MA (Г)	X	1,10	0,90	0,85	0,78	0,82	1,11	1,37	1,66	-	-	$Y = 0,26 + 0,56 \cdot X$	0,95	Y	0,81	0,73	0,81	0,74	0,69	0,91	0,97	1,25	-	-	X19H2Г5Т	X	0,20	0,20	0,36	1,60	1,80	-	-	-	-	-	$Y = 0,97 + 0,46 \cdot X$	0,90	Y	1,20	0,80	1,24	1,83	1,67	-	-	-	-	-	BT3-1	X	0,48	0,21	0,17	0,18	0,18	0,25	-	-	-	-	$Y = 0,55 + 1,4 \cdot X$	0,98	Y	1,21	0,87	0,78	0,75	0,75	0,92	-	-	-	-	BT22	X	0,32	0,17	0,22	0,28	-	-	-	-	-	-	$Y = 2,23 \cdot X$	0,99	Y	0,71	0,38	0,49	0,63	-	-	-	-	-	-																																																																																																	
15X2HMA	X	0,74	0,73	0,74	0,82	0,82	0,93	1,05	1,77	-	-	$Y = 3,67 + 1,56 \cdot X$	0,71																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Y	0,91	0,97	0,97	0,98	0,98	1,06	1,04	1,60	-	-			5XHT	X	0,16	0,27	0,39	0,41	0,54	0,75	0,92	0,77	-	-	$Y = 0,13 + 0,5 \cdot X$	0,92	Y	0,24	0,35	0,27	0,30	0,37	0,50	0,68	0,47	-	-	18X2H4MA (A)	X	1,35	1,26	0,62	0,43	0,35	0,52	1,77	1,79	-	-	$Y = 0,87 + 0,23 \cdot X$	0,82	Y	1,28	1,05	0,98	0,90	0,96	1,11	1,17	1,41	-	-	18X2H4MA (Б)	X	1,28	1,06	1,02	0,79	0,86	1,11	1,38	1,72	-	-	$Y = 0,2 + 0,65 \cdot X$	0,96	Y	1,08	0,96	0,91	0,66	0,77	0,87	1,03	1,33	-	-	18X2H4MA (B)	X	1,21	0,82	0,84	0,73	0,81	0,97	1,19	1,58	-	-	$Y = 0,33 + 0,75 \cdot X$	0,95	Y	1,36	1,00	0,93	0,89	0,89	0,95	1,27	1,45	-	-	18X2H4MA (Г)	X	1,10	0,90	0,85	0,78	0,82	1,11	1,37	1,66	-	-	$Y = 0,26 + 0,56 \cdot X$	0,95	Y	0,81	0,73	0,81	0,74	0,69	0,91	0,97	1,25	-	-	X19H2Г5Т	X	0,20	0,20	0,36	1,60	1,80	-	-	-	-	-	$Y = 0,97 + 0,46 \cdot X$	0,90	Y	1,20	0,80	1,24	1,83	1,67	-	-	-	-	-	BT3-1	X	0,48	0,21	0,17	0,18	0,18	0,25	-	-	-	-	$Y = 0,55 + 1,4 \cdot X$	0,98	Y	1,21	0,87	0,78	0,75	0,75	0,92	-	-	-	-	BT22	X	0,32	0,17	0,22	0,28	-	-	-	-	-	-	$Y = 2,23 \cdot X$	0,99	Y	0,71	0,38	0,49	0,63	-	-	-	-	-	-																																																																																																																										
5XHT	X	0,16	0,27	0,39	0,41	0,54	0,75	0,92	0,77	-	-	$Y = 0,13 + 0,5 \cdot X$	0,92																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Y	0,24	0,35	0,27	0,30	0,37	0,50	0,68	0,47	-	-			18X2H4MA (A)	X	1,35	1,26	0,62	0,43	0,35	0,52	1,77	1,79	-	-	$Y = 0,87 + 0,23 \cdot X$	0,82	Y	1,28	1,05	0,98	0,90	0,96	1,11	1,17	1,41	-	-	18X2H4MA (Б)	X	1,28	1,06	1,02	0,79	0,86	1,11	1,38	1,72	-	-	$Y = 0,2 + 0,65 \cdot X$	0,96	Y	1,08	0,96	0,91	0,66	0,77	0,87	1,03	1,33	-	-	18X2H4MA (B)	X	1,21	0,82	0,84	0,73	0,81	0,97	1,19	1,58	-	-	$Y = 0,33 + 0,75 \cdot X$	0,95	Y	1,36	1,00	0,93	0,89	0,89	0,95	1,27	1,45	-	-	18X2H4MA (Г)	X	1,10	0,90	0,85	0,78	0,82	1,11	1,37	1,66	-	-	$Y = 0,26 + 0,56 \cdot X$	0,95	Y	0,81	0,73	0,81	0,74	0,69	0,91	0,97	1,25	-	-	X19H2Г5Т	X	0,20	0,20	0,36	1,60	1,80	-	-	-	-	-	$Y = 0,97 + 0,46 \cdot X$	0,90	Y	1,20	0,80	1,24	1,83	1,67	-	-	-	-	-	BT3-1	X	0,48	0,21	0,17	0,18	0,18	0,25	-	-	-	-	$Y = 0,55 + 1,4 \cdot X$	0,98	Y	1,21	0,87	0,78	0,75	0,75	0,92	-	-	-	-	BT22	X	0,32	0,17	0,22	0,28	-	-	-	-	-	-	$Y = 2,23 \cdot X$	0,99	Y	0,71	0,38	0,49	0,63	-	-	-	-	-	-																																																																																																																																																			
18X2H4MA (A)	X	1,35	1,26	0,62	0,43	0,35	0,52	1,77	1,79	-	-	$Y = 0,87 + 0,23 \cdot X$	0,82																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Y	1,28	1,05	0,98	0,90	0,96	1,11	1,17	1,41	-	-			18X2H4MA (Б)	X	1,28	1,06	1,02	0,79	0,86	1,11	1,38	1,72	-	-	$Y = 0,2 + 0,65 \cdot X$	0,96	Y	1,08	0,96	0,91	0,66	0,77	0,87	1,03	1,33	-	-	18X2H4MA (B)	X	1,21	0,82	0,84	0,73	0,81	0,97	1,19	1,58	-	-	$Y = 0,33 + 0,75 \cdot X$	0,95	Y	1,36	1,00	0,93	0,89	0,89	0,95	1,27	1,45	-	-	18X2H4MA (Г)	X	1,10	0,90	0,85	0,78	0,82	1,11	1,37	1,66	-	-	$Y = 0,26 + 0,56 \cdot X$	0,95	Y	0,81	0,73	0,81	0,74	0,69	0,91	0,97	1,25	-	-	X19H2Г5Т	X	0,20	0,20	0,36	1,60	1,80	-	-	-	-	-	$Y = 0,97 + 0,46 \cdot X$	0,90	Y	1,20	0,80	1,24	1,83	1,67	-	-	-	-	-	BT3-1	X	0,48	0,21	0,17	0,18	0,18	0,25	-	-	-	-	$Y = 0,55 + 1,4 \cdot X$	0,98	Y	1,21	0,87	0,78	0,75	0,75	0,92	-	-	-	-	BT22	X	0,32	0,17	0,22	0,28	-	-	-	-	-	-	$Y = 2,23 \cdot X$	0,99	Y	0,71	0,38	0,49	0,63	-	-	-	-	-	-																																																																																																																																																																												
18X2H4MA (Б)	X	1,28	1,06	1,02	0,79	0,86	1,11	1,38	1,72	-	-	$Y = 0,2 + 0,65 \cdot X$	0,96																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Y	1,08	0,96	0,91	0,66	0,77	0,87	1,03	1,33	-	-			18X2H4MA (B)	X	1,21	0,82	0,84	0,73	0,81	0,97	1,19	1,58	-	-	$Y = 0,33 + 0,75 \cdot X$	0,95	Y	1,36	1,00	0,93	0,89	0,89	0,95	1,27	1,45	-	-	18X2H4MA (Г)	X	1,10	0,90	0,85	0,78	0,82	1,11	1,37	1,66	-	-	$Y = 0,26 + 0,56 \cdot X$	0,95	Y	0,81	0,73	0,81	0,74	0,69	0,91	0,97	1,25	-	-	X19H2Г5Т	X	0,20	0,20	0,36	1,60	1,80	-	-	-	-	-	$Y = 0,97 + 0,46 \cdot X$	0,90	Y	1,20	0,80	1,24	1,83	1,67	-	-	-	-	-	BT3-1	X	0,48	0,21	0,17	0,18	0,18	0,25	-	-	-	-	$Y = 0,55 + 1,4 \cdot X$	0,98	Y	1,21	0,87	0,78	0,75	0,75	0,92	-	-	-	-	BT22	X	0,32	0,17	0,22	0,28	-	-	-	-	-	-	$Y = 2,23 \cdot X$	0,99	Y	0,71	0,38	0,49	0,63	-	-	-	-	-	-																																																																																																																																																																																																					
18X2H4MA (B)	X	1,21	0,82	0,84	0,73	0,81	0,97	1,19	1,58	-	-	$Y = 0,33 + 0,75 \cdot X$	0,95																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Y	1,36	1,00	0,93	0,89	0,89	0,95	1,27	1,45	-	-			18X2H4MA (Г)	X	1,10	0,90	0,85	0,78	0,82	1,11	1,37	1,66	-	-	$Y = 0,26 + 0,56 \cdot X$	0,95	Y	0,81	0,73	0,81	0,74	0,69	0,91	0,97	1,25	-	-	X19H2Г5Т	X	0,20	0,20	0,36	1,60	1,80	-	-	-	-	-	$Y = 0,97 + 0,46 \cdot X$	0,90	Y	1,20	0,80	1,24	1,83	1,67	-	-	-	-	-	BT3-1	X	0,48	0,21	0,17	0,18	0,18	0,25	-	-	-	-	$Y = 0,55 + 1,4 \cdot X$	0,98	Y	1,21	0,87	0,78	0,75	0,75	0,92	-	-	-	-	BT22	X	0,32	0,17	0,22	0,28	-	-	-	-	-	-	$Y = 2,23 \cdot X$	0,99	Y	0,71	0,38	0,49	0,63	-	-	-	-	-	-																																																																																																																																																																																																																														
18X2H4MA (Г)	X	1,10	0,90	0,85	0,78	0,82	1,11	1,37	1,66	-	-	$Y = 0,26 + 0,56 \cdot X$	0,95																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Y	0,81	0,73	0,81	0,74	0,69	0,91	0,97	1,25	-	-			X19H2Г5Т	X	0,20	0,20	0,36	1,60	1,80	-	-	-	-	-	$Y = 0,97 + 0,46 \cdot X$	0,90	Y	1,20	0,80	1,24	1,83	1,67	-	-	-	-	-	BT3-1	X	0,48	0,21	0,17	0,18	0,18	0,25	-	-	-	-	$Y = 0,55 + 1,4 \cdot X$	0,98	Y	1,21	0,87	0,78	0,75	0,75	0,92	-	-	-	-	BT22	X	0,32	0,17	0,22	0,28	-	-	-	-	-	-	$Y = 2,23 \cdot X$	0,99	Y	0,71	0,38	0,49	0,63	-	-	-	-	-	-																																																																																																																																																																																																																																																							
X19H2Г5Т	X	0,20	0,20	0,36	1,60	1,80	-	-	-	-	-	$Y = 0,97 + 0,46 \cdot X$	0,90																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Y	1,20	0,80	1,24	1,83	1,67	-	-	-	-	-			BT3-1	X	0,48	0,21	0,17	0,18	0,18	0,25	-	-	-	-	$Y = 0,55 + 1,4 \cdot X$	0,98	Y	1,21	0,87	0,78	0,75	0,75	0,92	-	-	-	-	BT22	X	0,32	0,17	0,22	0,28	-	-	-	-	-	-	$Y = 2,23 \cdot X$	0,99	Y	0,71	0,38	0,49	0,63	-	-	-	-	-	-																																																																																																																																																																																																																																																																																
BT3-1	X	0,48	0,21	0,17	0,18	0,18	0,25	-	-	-	-	$Y = 0,55 + 1,4 \cdot X$	0,98																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Y	1,21	0,87	0,78	0,75	0,75	0,92	-	-	-	-			BT22	X	0,32	0,17	0,22	0,28	-	-	-	-	-	-	$Y = 2,23 \cdot X$	0,99	Y	0,71	0,38	0,49	0,63	-	-	-	-	-	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
BT22	X	0,32	0,17	0,22	0,28	-	-	-	-	-	-	$Y = 2,23 \cdot X$	0,99																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Y	0,71	0,38	0,49	0,63	-	-	-	-	-	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				

Следует отметить, что коэффициент «К» в уравнениях регрессии (табл. 2) для высокоуглеродистых сталей (У8, У10) значительно выше, чем для сталей с меньшим содержанием углерода, что указывает на более высокую чувствительность параметра  $A$  к изменению вязкости прочных материалов по сравнению с ударной вязкостью. Аналогичные испытания были проведены при комнатной температуре, результаты которых представлены в табл. 3.

Если расположить значения коэффициента «К» в уравнениях регрессии, выведенных в результате испытаний при комнатной температуре, в зависимости от средней величины ударной вязкости ( $KCU_{cp}$ ) каждой стали, определенной как среднее минимального и максимального значения  $KCU$ , полученных при испытаниях (табл. 3), то выявляется общая тенденция: с уменьшением  $KCU_{cp}$  растет коэффициент «К» (рис. 3). Это означает, что с уменьшением запаса вязкости материала стандартная характеристика  $KCU$  перестает адекватно регистрировать изменение его свойств с изменением структуры, в то время как параметр  $A$  остается структурно-чувствительным.

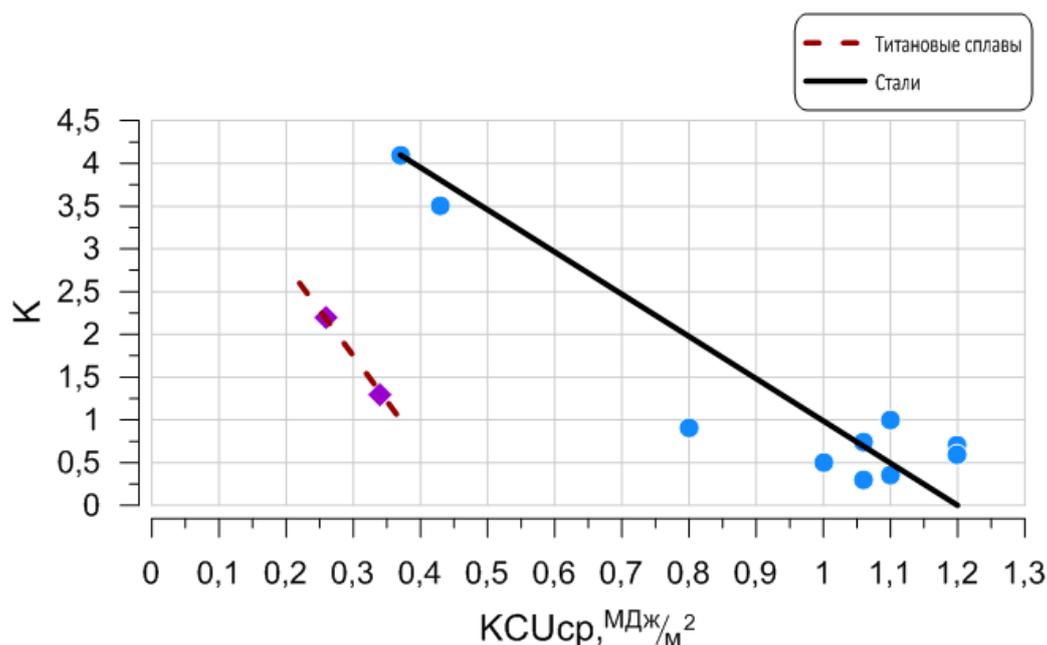


Рис. 3. Зависимость между средним значением ударной вязкости сталей и коэффициентом  $K$

Проведенные исследования оценки охрупчивания сталей при радиационном воздействии на металлические конструкции во время эксплуатации реакторных установок по параметрам микропластической деформации позволяют сделать следующие выводы.

1. При использовании параметров микропластической деформации в качестве индикатора охрупчивания в результате радиационного воздействия, была установлена чувствительность к обратимой отпускной хрупкости мартенситностареющих сталей, считавшихся ранее не чувствительными к этому виду хрупкости.

2. Оценка данного вида охрупчивания по параметру микропластической деформации стали 40Х, является более объективной, чем по изменению параметра ударной вязкости.

3. Предотвращение развития обратимой отпускной хрупкости, вследствие, радиационного воздействия на сталь 18Х2Н4МА можно достигнуть путем проведения циклической гомогенизации с измельчением аустенитного зерна и значительным снижением микронеоднородности распределения хрома и никеля в твердом растворе.

4. При измельчении величины зерна и уменьшении химической микронеоднородности матрицы стали 18Х2Н4МА параметры  $KCU/KCUX$  и  $A/AX$  дают близкие по величине результаты.



5. Циклическая гомогенизация значительно повышает радиационную стойкость литой стали 18Х2Н4МА, что позволяет моделировать радиационное воздействие на материал иницированием развития обратимой отпускной хрупкости.

6. Зависимости КСУ(Т) и А(Т) для всех испытанных сталей имеют пороговый характер.

Близость кривых данных температурных зависимостей позволила оценить наличие корреляции между параметрами КСУ и А.

7. Параметр А обладает более высокой чувствительностью к изменению вязкости облученных материалов по сравнению с параметром ударной вязкости, в связи с более высоким коэффициент «К» в уравнениях регрессии для высокоуглеродистых сталей, чем для сталей с меньшим содержанием углерода.

8. Параметр А остается структурно чувствительным при уменьшении запаса вязкости материала, в отличие от параметра ударной вязкости КСУ, который перестает адекватно регистрировать изменение свойств металла при изменении структуры.

### Библиографический список

1. **Крюков, Л.Т.** Контроль механических свойств материалов реакторного оборудования по параметрам микропластической деформации / Л.Т. Крюков, М.И. Ершова // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2019. – №3 (126). – С. 67-72.
2. **Garrison, W.M.** The Effects of Silicon and Nickel Additions on the Mechanical Properties of a 0.4 Carbon Low Alloy Steel // Scr. met. – 1982. – №16. – P. 877-880.
3. **Карк, Г.С.** Связь между радиационным охрупчиванием и отпускной хрупкостью низколегированной стали / Г.С. Карк, А.А. Астафьев, С.И. Марков // ФММ. – 1984. – №3 (57). – С. 592-598.
4. **Wozniak, Y.** Stanoveni kriticke teploty krehkosti pricneho rozsireni zkusebniho teliska zkousky razem ohybu / Y. Wozniak, M. Yakob // Kovove materialy – 1983. – № 2. – P. 206-212.

*Дата поступления  
в редакцию: 29.03.2020*

**M.I. Ershova, L.T. Kryukov**

### USING PARAMETERS OF MICROPLASTIC DEFORMATION TO EVALUATE EMBRITTLMENT OF REACTOR EQUIPMENT MATERIALS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

**The purpose of the research:** is to substantiate the use of microplastic deformation parameters for evaluating the embrittlement of steels under radiation exposure to metal structures during operation of reactor plants.

**Approach:** studies have been conducted to prevent embrittlement by conducting cyclic homogenization with grinding of austenitic grains and significantly reducing the micro-uniformity of the distribution of chromium and nickel in a solid solution. Methods of increasing the radiation resistance of steels by suppressing the reversible release brittleness are investigated.

**Results and their application:** microplastic deformation Parameters should be used as an indicator of steel embrittlement. Due to the application of microplastic deformation parameters, the sensitivity of martensitic-aging steels to reversible release brittleness was established. The similarity of processes in the development of reversible release brittleness and radiation embrittlement of steels was established.

**Conclusions:** conclusions are made about methods of modeling radiation effects on steel by initiating the development of reversible release brittleness.

*Key words:* reactor plant, nuclear power plant, radiation exposure, parameters of microplastic deformation, impact strength, embrittlement of steels, reversible release brittleness.