

**БЕЛИКОВ С.Б.**, докт. техн. наук, ректор, ЗНТУ, Запорожье

**РЯГИН С.Л.**, канд. техн. наук, доцент, ЗНТУ, Запорожье

**ШЕВЧЕНКО В.Г.**, канд. техн. наук, зав.кафедрой, ЗНТУ, Запорожье

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ УДАРНОМУ ИЗГИБУ ПЛАСТИЧНЫХ СТАЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В КРАНОСТРОЕНИИ**

На примере пластичной стали 09Г2С экспериментально показано, что ударная вязкость зависит от формы и размеров образца и потому не может использоваться в качестве характеристики материала. Предложена альтернативная характеристика – удельная ударная вязкость, основанная на учете параметров пластической деформации образца. Показано, что для пластичных сталей энергия разрушения образца может не быть пропорциональна площади поверхности разрушения.

На прикладі пластичної сталі 09Г2С експериментально показано, що ударна в'язкість залежить від форми та розмірів зразка і тому не може використовуватись в якості характеристики матеріала. Запропоновано альтернативну характеристику – питому ударну в'язкість, засновану на врахуванні параметрів пластичної деформації зразка. Показано, що для пластичних сталей енергія руйнування зразка може не бути пропорційна площі поверхні руйнування.

Using plastic steel 09Г2С it was shown by means of experiment that an impact elasticity depends on specimen form and dimensions and consequently can not be used as material characteristic. The alternative characteristic was offered – specific impact elasticity, which takes into account specimen plastic deformation parameters. It was shown that for plastic steels specimen destruction energy can be not proportional to failure surface area.

### **Вступление**

Совершенствование учета механических характеристик применяемых материалов является одной из важных составляющих повышения точности расчетных моделей, и потому связано с важным научным и практическим заданием улучшения качества и конкурентоспособности продукции отечественного краностроения.

Общеизвестно, что предел прочности пластичных материалов (из-за образования шейки) и предел текучести хрупких материалов имеют условный характер [1], хоть и приводятся в марочниках и традиционно используются в расчетной практике.

В справочном пособии [2] указывается, что еще одна традиционная механическая характеристика, ударная вязкость – "технологическая проба для оценки склонности материалов к хрупкому разрушению", "зависит от ряда других прочностных и пластических свойств материала", т.е. по сути тоже имеет условный характер. При этом в [2] рекомендуется при определении ударной вязкости использовать только один типоразмер образца при унифицированных условиях испытаний, "поскольку во время динамических испытаний закон подобия не действует".

Однако это не только противоречит стандарту [3], предусматривающему ряд стандартизованных типов образцов с поперечными сечениями разных размеров, но и закрепленному в этом стандарте исходному постулату механики

разрушения, согласно которому энергия разрушения образца пропорциональна площади поверхности разрушения и, следовательно, не должна зависеть ни от размеров, ни от формы сечения.

Поскольку в справочном пособии [2] не приведено подробного исследования данного противоречия, данная статья, в развитие положений [2], посвящается исследованию зависимости ударной вязкости от размеров сечений образцов на примере одной из пластичных сталей, применяемых в краностроении.

Целью данной статьи является экспериментальное изучение связи между энергией разрушения образцов из стали 09Г2С, широко применяемой в краностроении, и их геометрическими характеристиками при испытаниях на ударный изгиб при комнатной и пониженной температурах.

### **Метод исследований**

Для проведения исследований из листовой стали 09Г2С было изготовлено 7 групп по 5 образцов с V-образными надрезами: размеры 4-х групп были приближены к типам 11, 12, 13, 14 по стандарту [3], еще 3 группы (А5, В6, С7), с целью расширения диапазона форм, были выполнены с альтернативными размерами поперечного сечения. Начальные размеры образцов приведены в табл.1. Из табл.1 видно, что образцы различных групп отличаются как площадью поперечного сечения, так и его формой.

Испытания на ударный изгиб проводились на копре Tinius Olsen (модель IT542E), позволяющем с высокой точностью определять энергию разрушения А. Испытания проводились при пяти температурах  $t$ , для каждой из которых выбиралось по одному образцу из каждой группы.

### **Результаты и их обсуждение**

Результаты проведенных испытаний приведены в табл.1.

Площадь поперечного сечения рассчитывалась по традиционной формуле:

$$F = H_1 \cdot B.$$

Для количественной оценки формы поперечного сечения был введен безразмерный коэффициент формы:

$$\alpha = \frac{H_1}{B}.$$

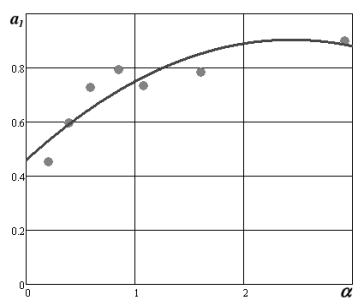
Эмпирические коэффициенты корреляции для ударной вязкости  $a_1$ , площади сечения  $F$  и коэффициента формы  $\alpha$  сведены в табл.2. Из табл.2 видно, что между  $a_1$  и  $F$  слабая связь возникает лишь при  $t \leq -40^\circ\text{C}$ , зато между  $a_1$  и  $\alpha$  существует выраженная корреляционная связь, ослабевающая лишь при  $t = -60^\circ\text{C}$ . Значения  $a_1$  в виде зависимостей от  $\alpha$  для всех температур испытаний  $t$  показаны на рис.1а.

Таблица 1 – Результаты испытаний образцов из стали 09Г2С

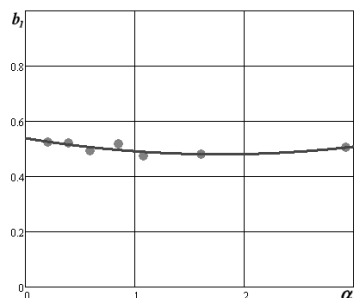
Образец		Начальные размеры, mm			Температура испытаний $t, ^\circ\text{C}$	Энергия разрушения образца $A, \text{J}$	Наибольшая ширина после испытаний $W, \text{mm}$
Группа	№	Ширина $B$	Высота $H$	Высота рабочего сечения $H_1$			
11	11	9,28	9,97	7,90	10	58,252	10,62
	12	9,28	9,98	8,01	0	61,955	10,72
	13	9,29	9,98	7,98	-20	55,980	10,57
	14	9,29	9,98	7,99	-40	39,462	10,27
	15	9,30	9,97	7,92	-60	30,745	10,10
12	21	7,37	9,88	7,97	10	43,111	8,71
	22	7,37	9,88	7,94	0	41,543	8,67
	23	7,38	9,88	7,88	-20	39,877	8,56
	24	7,37	9,87	7,96	-40	35,745	8,47
	25	7,37	9,91	7,94	-60	22,734	8,12
13	31	4,98	9,93	7,99	10	31,150	6,33
	32	4,98	9,93	8,00	0	30,846	6,32
	33	4,97	9,95	7,82	-20	28,422	6,29
	34	4,99	9,93	7,92	-40	28,020	6,20
	35	4,97	9,93	7,84	-60	23,229	6,01
14	41	2,05	8,15	6,00	10	11,088	3,12
	42	2,04	8,15	6,03	0	11,564	3,15
	43	2,03	8,15	6,00	-20	11,278	3,12
	44	2,03	8,15	6,03	-40	11,755	3,23
	45	2,04	8,16	6,00	-60	9,3812	2,97
A5	51	9,94	7,98	5,87	10	42,483	11,07
	52	9,95	7,96	6,00	0	47,110	11,18
	53	9,95	7,96	5,99	-20	46,899	11,18
	54	9,94	7,97	6,02	-40	27,518	10,71
	55	9,95	7,96	5,96	-60	17,437	10,45
B6	61	9,98	5,86	3,94	10	23,428	10,72
	62	9,98	5,87	3,95	0	17,146	10,69
	63	9,99	5,87	3,93	-20	20,271	10,68
	64	9,99	5,87	3,91	-40	19,682	10,69
	65	9,99	5,86	3,92	-60	27,417	10,80
C7	71	9,84	3,98	2,02	10	9,0032	10,25
	72	9,83	3,99	2,02	0	7,4027	10,23
	73	9,85	4,00	2,06	-20	9,9492	10,32
	74	9,88	4,00	2,00	-40	8,1548	10,25
	75	9,85	4,00	2,05	-60	8,9088	10,28

Таблица 2 – Эмпирические коэффициенты корреляции для ударной вязкости  $a_1$ , площади сечения  $F$  и коэффициента формы  $\alpha$

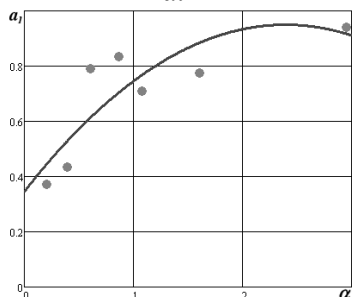
$t, ^\circ\text{C}$	$a_1/F$	$a_1/\alpha$
10	0.179	0.813
0	0.239	0.746
-20	0.064	0.807
-40	-0.440	0.989
-60	-0.672	0.586



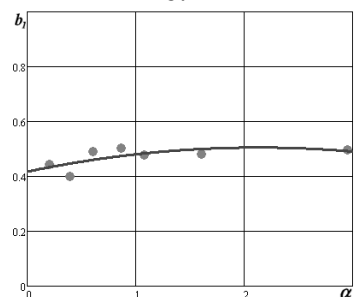
a.1



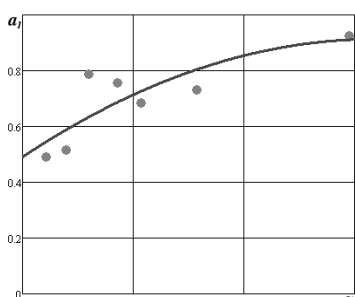
b.1



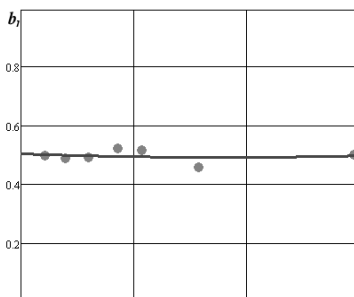
a.2



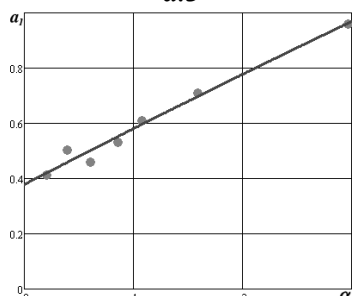
b.2



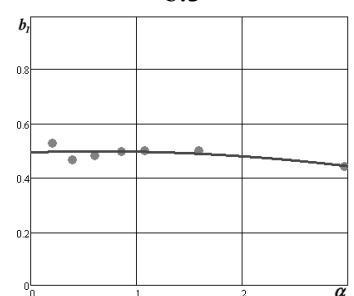
a.3



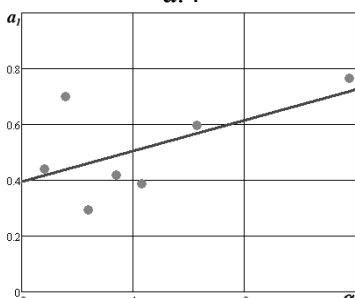
b.3



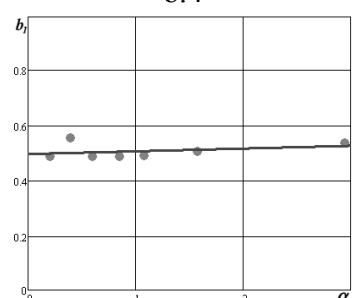
a.4



b.4



a.5



b.5

а – ударная вязкость  $a_1$  [ $\text{J}/\text{mm}^2$ ]  
 б – удельная ударная вязкость  $b_1$   
 [ $\text{J}/\text{mm}^{2.617}$ ]

1 –  $t=+10^\circ\text{C}$   
 2 –  $t=0^\circ\text{C}$   
 3 –  $t=-20^\circ\text{C}$   
 4 –  $t=-40^\circ\text{C}$   
 5 –  $t=-60^\circ\text{C}$

Рис. 1. Зависимость ударной вязкости  $a_1$  и удельной ударной вязкости  $b_1$  от коэффициента формы сечения  $\alpha$  для разных температур испытаний  $t$

Из рис.1а видно, что для одного и того же материала при фиксированной температуре испытаний  $t$  величина ударной вязкости  $a_1$  изменяется до 2.5 раз в зависимости от формы сечения образца. (Здесь и далее на графиках экспериментальные данные аппроксимированы квадратичной параболой с помощью метода наименьших квадратов, за исключением рис.1а.5, на котором данные из-за сильного разброса аппроксимированы прямой.) Очевидно, что, по крайней мере для стали 09Г2С, энергия разрушения образца не пропорциональна площади поверхности разрушения, а классическая ударная вязкость не может использоваться в качестве характеристики материала. Сказанное подтверждает и развивает приведенные в справочном пособии [2] положения и ставит под сомнение стандарт [3].

Также примечательно, что зависимости ударной вязкости  $a_1$  от температуры испытаний  $t$  для образцов групп 11, 12, 13, А5 имеют классический характер, а для групп с наибольшими и наименьшими значениями  $\alpha$  даже по форме отличаются от традиционного вида (группы 14, С7 и, особенно, В6).

Для объяснения полученных результатов авторы взяли за основу альтернативную гипотезу механизма разрушения образца при испытаниях на ударный изгиб. В зоне ослабленного сечения возникает подобие пластического шарнира. Волокна в верхней половине сечения пластически деформируются аналогично образцу при испытании на разрыв, вплоть до их разрушения, начиная от верхнего края сечения. Волокна в нижней половине сечения сперва испытывают пластическую деформацию сжатия, а затем, по мере смещения нейтральной линии, растягиваются вплоть до разрушения. При этом верхняя часть сечения должна сужаться, а нижняя – нелинейно расширяться.

Для подтверждения данной гипотезы на рис.2 в качестве примера показана поверхность разрушения образца №22. Ее форма соответствует описанным процессам пластического деформирования при разрушении образца.



Рис. 2. Поверхность разрушения образца №22, иллюстрирующая процессы пластического деформирования при ударном изгибе

Детальная разработка теоретической модели, описывающей эти процессы, на данном этапе затруднительна по многим причинам, в частности – из-за необходимости предварительного изучения работы пластического деформирования волокон при ударном нагружении (при различных соотношениях последовательного сжатия и растяжения, для разных температур).

Однако возможно создание эмпирической модели, адекватно описывающей полученные экспериментальные результаты.

Исходя из сказанного, эмпирическая модель была основана на том, что для конструкционных материалов, не являющихся идеально хрупкими, энергия разрушения в первую очередь зависит от работы пластической деформации образца. Альтернативная характеристика, которую можно назвать удельной ударной вязкостью, должна иметь другую размерность. В знаменателе вместо

$[m^2]$  были бы  $[m^3]$ , размерность пластического момента сопротивления, но нелинейный характер деформации должен несколько изменить величину этой степени.

Для количественной оценки пластической деформации образца был введен безразмерный коэффициент поперечного расширения:

$$\varphi = \frac{W - B}{B},$$

где  $W$  – наибольшая ширина образца после испытаний (см. рис.2 и табл.1).

Зависимости коэффициента поперечного расширения  $\varphi$  от коэффициента формы  $\alpha$  для всех температур испытаний  $t$  приведены на рис.3. Соответствующие эмпирические коэффициенты корреляции изменяются в пределах от 0.975 до 0.999, что указывает на тесную связь  $\varphi$  и  $\alpha$ .

Из рис.3 заметно, что функциональная зависимость  $\varphi$  от  $\alpha$  с падением температуры становится более нелинейной.

В наиболее общем случае, удельную ударную вязкость  $b$  следует искать в виде функциональной зависимости  $f_1$ :

$$b = f_1(A, \varphi, t, B, H_1, H). \quad (1)$$

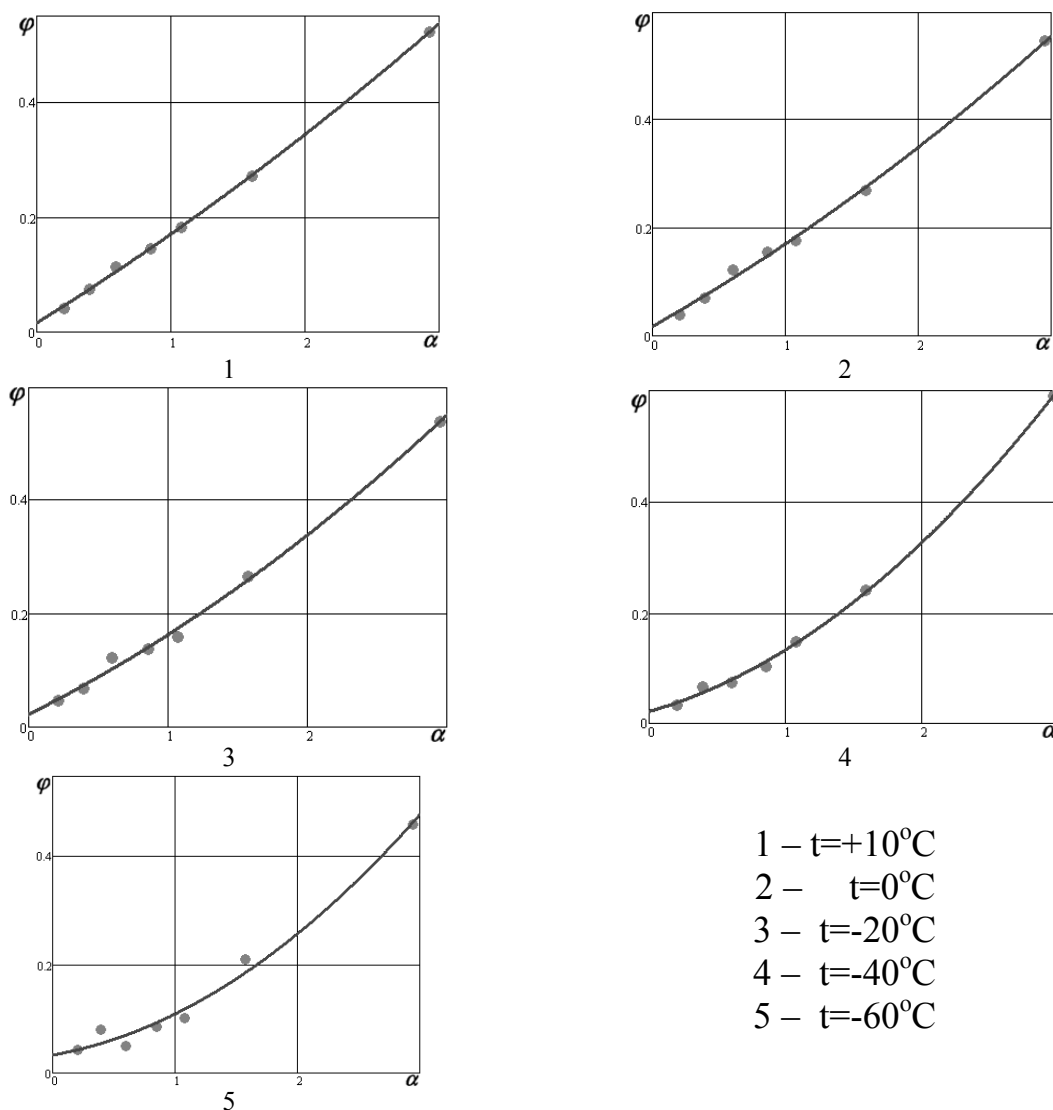


Рис. 3. Зависимость коэффициента поперечного расширения  $\varphi$  от коэффициента формы сечения  $\alpha$  для разных температур испытаний  $t$

Поскольку в настоящий момент рассматривается всего 35 экспериментальных точек для одной стали, эту зависимость в первом приближении можно упростить, взяв за основу формулу пластического момента сопротивления:

$$b = \frac{A}{B^k \cdot H_1^m \cdot f_2(\varphi)}. \quad (2)$$

В качестве критерия оценки зависимостей было использовано приведенное среднеквадратическое отклонение  $S$ : для каждой из пяти температур испытаний определялось среднее арифметическое семи значений зависимости, на которое эти значения делились; затем для всех 35-ти приведенных значений определялось среднеквадратическое отклонение относительно уже единичных средних арифметических. По сути,  $S$  отражает относительный совокупный разброс значений зависимости для образцов разной формы и площади в пределах каждой из температур испытаний.

В качестве функциональной зависимости  $f_2$  было бы целесообразно использовать степенной ряд. Но, при ограниченном количестве экспериментальных точек, с целью уменьшения числа определяемых параметров  $n$  для начала можно ограничиться его первым слагаемым.

В результате обработки экспериментальных данных для определения удельной ударной вязкости был получен ряд зависимостей с различным числом определяемых параметров  $n$ . Некоторые из этих зависимостей приведены в табл.3.

Из табл.3 видно, что стандартная формула (3) для определения ударной вязкости имеет большую величину  $S$ . Использование в качестве  $f_2$  степенной функции позволяет для приведенной ударной вязкости (4) снизить величину  $S$  на порядок. Замена степенной функции на показательную (5), как частичная альтернатива использованию степенного ряда, позволяет дополнительно уменьшить величину  $S$  при сохранении прежнего  $n$ .

В качестве примера значения приведенной ударной вязкости  $b_1$  (5) в виде зависимостей от  $\alpha$  показаны на рис.1b.

Таблица 3 – Примеры зависимостей для оценки результатов испытаний на ударный изгиб образцов из стали 09Г2С

Номер формулы	Формула	Приведенное среднеквадратическое отклонение $S$	Число определяемых параметров $n$	Рисунки
(3)	$a_1 = \frac{A}{B \cdot H_1}$	0.5096	0	Рис.1а
(4)	$b_0 = \frac{A}{B^{2.024} \cdot H_1^{0.372} \cdot \varphi^{1.186}}$	0.0547	3	–
(5)	$b_1 = \frac{A}{B^{2.141} \cdot H_1^{0.476} \cdot (8.269^\alpha - 1)}$	0.0517	3	Рис.1b

Из сравнения рис.1а и рис.1б видно, что величина  $b_1$ , в отличие от  $a_1$ , не имеет выраженной функциональной зависимости от  $\alpha$ , и разброс экспериментальных точек для нее носит преимущественно случайный характер. (При фиксированной температуре испытаний  $t$  величина приведенной ударной вязкости  $b_1$  изменяется до 1.25 раза в зависимости от формы сечения образца.)

Отдельно следует отметить, что выраженный разброс экспериментальных точек на рис.1а.5 уменьшается до естественного на рис.1б.5 ( $t=-60^\circ\text{C}$ ). Также интересно, что  $b_1$  меньше зависит от температуры испытаний, чем  $a_1$ .

Зависимости приведенной ударной вязкости  $b_0$  (4) от  $\alpha$  имеют характер, аналогичный  $b_1$ .

Дополнительно был предпринят ряд попыток найти другие зависимости для определения приведенной ударной вязкости в форме (2) при  $n=4$  и  $n=5$ . При этом было достигнуто улучшение результата лишь до величины  $S=0.0499$  в лучшем случае, что не может оправдать увеличения отношения  $n$  к количеству экспериментальных точек до 1/7.

Также было замечено, что функциональная зависимость  $f_2$  не должна содержать слагаемых без  $\varphi$ , т.е. должно выполняться условие:

$$f_2(\varphi = 0) = 0. \quad (6)$$

Отдельно следует отметить, что попытка найти смешанную зависимость в форме:

$$b_2 = \frac{A}{B^k \cdot H_1^m \cdot \varphi^l} + c \cdot a_1,$$

где  $c \in [0;1]$  – весовой коэффициент, привела к результату:  $c=0$ ,  $b_2=b_0$ .

Это открывает дополнительную перспективу для дальнейших исследований, поскольку, с учетом ограничения (6), зависимость в форме (2) непригодна для идеально хрупких материалов. Одним из перспективных направлений может быть учет потенциальной энергии упругой деформации образца, которая при его разрушении переходит в другие формы.

Также была предпринята попытка найти зависимость для определения приведенной ударной вязкости в форме, промежуточной между (2) и (1), при  $n=7$ . При этом была достигнута величина  $S=0.0445$ , что, при отношении  $n$  к количеству экспериментальных точек 1/5, не может трактоваться как лучший результат.

Расширение базы экспериментальных результатов, как количественное, так и для других материалов, температур и размеров сечений, могло бы дать возможность уточнить как форму зависимости для определения удельной ударной вязкости, так и величину определяемых параметров. Однако, как известно, ударная вязкость не используется в расчетах как количественный параметр, и служит лишь для оценки способности материала сопротивляться ударному нагружению. Причем оценка эта, как следует из [2] и данной статьи, носит условный характер. Поэтому еще более целесообразно было бы предложить для практического применения другую механическую характеристику, позволяющую как качественно, так и количественно оценивать способность материала сопротивляться ударному нагружению. Этому будут посвящены следующие статьи авторов.

## Выводы

Таким образом, на примере стали 09Г2С показано, что для пластичных материалов энергия разрушения образца может не быть пропорциональна площади поверхности разрушения. Полученные результаты также подтверждают, что ударная вязкость не всегда может использоваться в качестве характеристики материала. Это дает основания поставить вопрос о необходимости дальнейшей проверки и переработки стандарта [3].

В перспективе возможно уточнение альтернативной зависимости для определения удельной ударной вязкости, на основе расширения базы экспериментальных результатов. Еще более целесообразно нахождение другой механической характеристики для оценки способности материала сопротивляться ударному нагружению.

**Список литературы:** 1. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с. 2. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під заг. ред. В.В.Панасюка. Т.9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / Остап О.П., Федірко В.М. та інш. – Львів: Вид-во "Сполом", 2007. – 1068 с. 3. Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах: ГОСТ 9454-78. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 11 с.

## УДК 620.179.14

**СЕБКО В.В.**, д.т.н., проф. НТУ «ХПИ»

**ПИТАК И.В.**, к.т.н., доц. НТУ «ХПИ»

**СЕБКО В.П.**, д.т.н., проф. НТУ «ХПИ»

**ЗДОРЕНКО В.Г.**, д.т.н., проф. КНУТД, Киев

**ЗАЩЕПКИНА Н.М.**, к.т.н., доц. КНУТД, Киев.

## ТОЧНОСТЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛОСКИХ ИЗДЕЛИЙ ЗА СЧЕТ СОЗДАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ

Исследована возможность идентификации ферромагнитных плоских изделий, за счет создания информационной избыточности с помощью теплового трансформаторного вихретокового датчика (ТВД).

Досліджено можливість ідентифікації ферромагнітних плоских виробів за рахунок створення інформаційної надмірності за допомогою теплового трансформаторного вихреструмного датчика (ТВД).

The possibility of identifying ferromagnetic flat items is researched, at the expense of building information redundancy with the help on the thermal transformer eddy current sensor (TES).

На сегодняшний день в таких отраслях промышленности Украины как приборостроение, машиностроение и других, важное значение приобретают вихретоковые методы и устройства контроля параметров ферромагнитных плоских изделий. Среди известных вихретоковых методов контроля ферромагнитных пластин, особо выделяются методы и устройства, позволяющие