

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОРІЄНТАЦІЇ КОНЦЕНТРАТОРА ВІДНОСНО ОСІ ТРУБОПРОВОДУ НА СКЛАДОВІ ЕНЕРГІЇ РУЙНУВАННЯ ТА ТЕМПЕРАТУРУ В'ЯЗКО-КРИХКОГО ПЕРЕХОДУ ЗРАЗКІВ ШАРПІ ЗІ СТАЛІ 22К

<sup>1</sup> Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, м. Київ

*На інструментованому вертикальному копрі при різних температурах проведено ударні випробування стандартних зразків Шарпі зі сталі 22К, вирізаних у двох напрямках – повздовжньому та поперечному. За результатами випробувань побудовано температурні залежності повної енергії деформування та руйнування її складових. За результатами фрактографічних досліджень отримано температурні залежності долей характерних зон зламів для двох груп зразків Шарпі та проведено їх порівняння. Визначено температури в'язко-крихкого переходу.*

### ВСТУП

В різних галузях промисловості, зокрема в атомній енергетиці, для визначення критичної температури крихкості застосовуються ударні випробування зразків Шарпі. Наприклад, при розрахунках на опір крихкому руйнуванню, необхідно знати значення критичної температури крихкості  $T_{k0}$  матеріалу у початковому стані, яке визначається за результатами ударних випробувань зразків Шарпі. При випробуваннях зразків з концентраторами на ударний згин існує відмінність у результатах для зразків, вирізаних у поперечному і повздовжньому напрямках. Тому на сьогоднішній день велику актуальність мають дослідження впливу напрямку вирізки зразків Шарпі та орієнтування надрізу на результати ударних випробувань та визначення критичної температури крихкості.

В роботі [1] показано, що в процесі гарячої обробки тиском дендрити подрібнюються та витягуються у волокна, розділені між собою прошарками металу з підвищеним вмістом домішок. Така структура визначає відмінність властивостей прокату в напрямках вздовж та впоперек прокатки. При цьому механічні властивості металу листів, труб, профілів, отримані при випробуваннях зразків, вирізаних вздовж напрямку прокатки, завжди вищі.

Волокниста макроструктура не має впливу на границю міцності, границю текучості і границю пропорційності, але помітно позначається на ударній в'язкості, поперечному звуженні, видовженні і границі витривалості [2]. Ці характеристики поліпшуються вздовж волокна і погіршуються впоперек.

Тому дослідження впливу напрямку вирізки зразків Шарпі і орієнтування надрізу на результати ударних випробувань та визначення критичної температури крихкості має велику актуальність.

### ОСНОВНА ЧАСТИНА

Основною метою цієї роботи є дослідження впливу напрямку вирізки зразків Шарпі зі сталі 22К та орієнтування надрізу на енергетичні характеристики руйнування та температуру в'язко-крихкого переходу.

Ударні випробування зразків Шарпі проводились на інструментованому вертикальному копрі [4], обладнаному багатоканальною системою реєстрації зусиль (частота дискретизації 20 МГц), а також системою нагріву та охолодження зразків в широкому діапазоні температур [5]. Об'єктом досліджень служили стандартні зразки Шарпі розміром 55×10×10 мм [6, 7]. Випробування проводились в діапазоні температур  $-50...+100$  °С при швидкості удару  $V_0 = 4,4$  м/с. Для досліджень були виготовлені стандартні зразки Шарпі (рис. 1) зі сталі 22К.

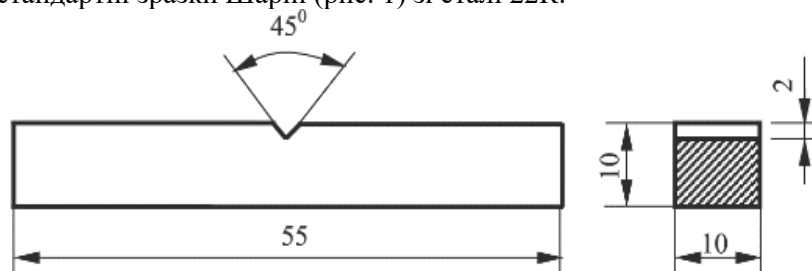


Рисунок 1 – Стандартний зразок Шарпі

Сталь 22К – це конструкційна вуглецева якісна сталь, яка застосовується для трубопроводів, фланців, патрубків, ємностей системи аварійної зупинки реактора ВВЕР 1000 АЕС, а також для виготовлення днищ, фланців, суцільнокованих і зварних барабанів парових котлів, напівмуфт, патрубків та інших деталей, що працюють при температурі від  $-40$  до  $450$  °С під тиском.

Зразки виготовлялись із частини трубопроводу  $\phi 160 \times 15$  зі сталі 22К. Для дослідження розповсюдження колової та осьової тріщини, їх було вирізано у двох напрямках – повздовжньому та поперечному за схемою, показаною на рис. 2. Концентратори наносились на тій стороні зразка, яка збігалася із внутрішньою стороною труби.

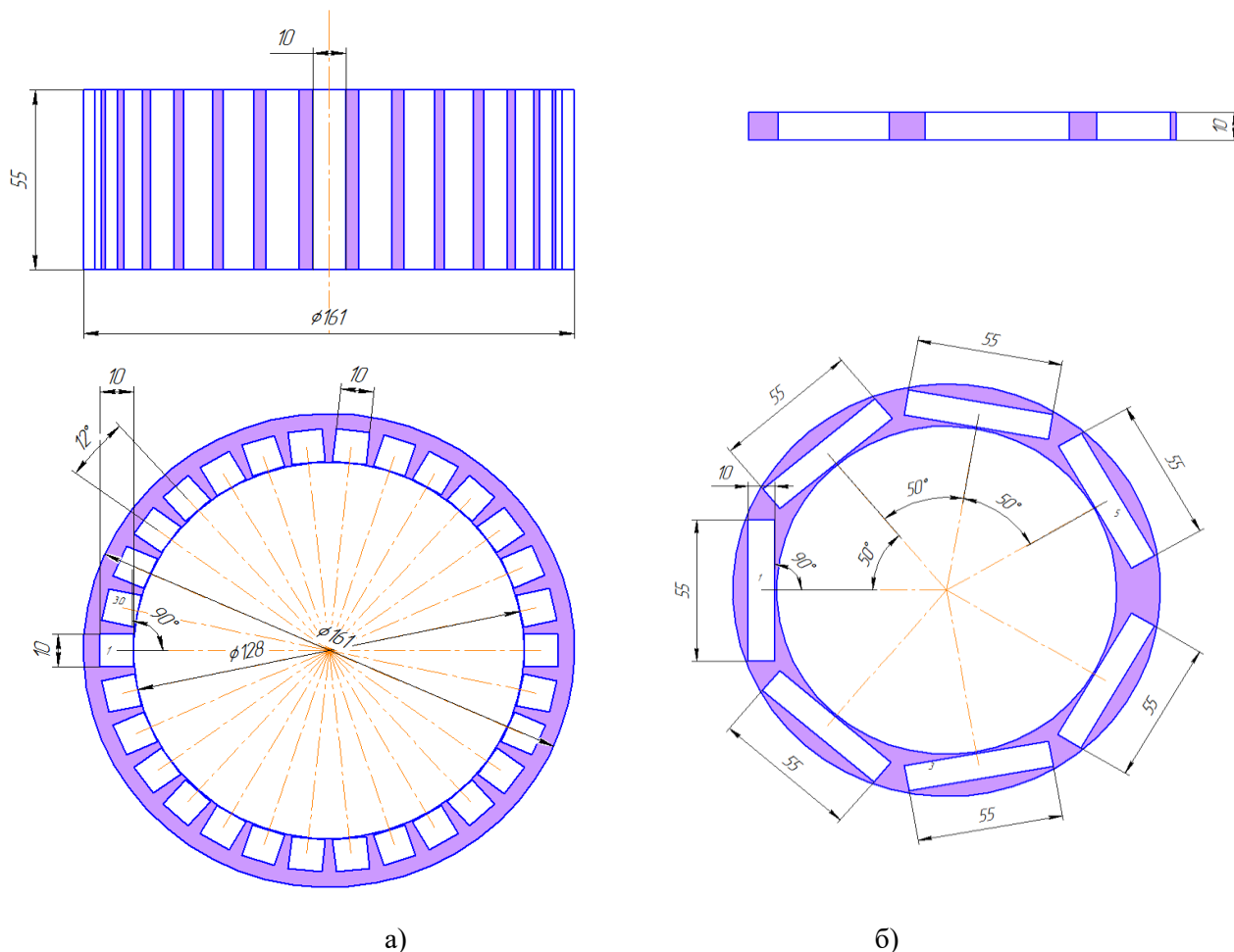


Рисунок 2 – Схема вирізки зразків із частини трубопроводу  $\phi 160 \times 15$  зі сталі 22К:  
 а) – поздовжні зразки з кільцевою тріщиною; б) – поперечні зразки з осьовою тріщиною

Відповідно, на зразках, вирізаних у повздовжньому напрямку, досліджувалось розповсюдження кільцевої тріщини (група зразків маркувалась КК), а у зразках, вирізаних у поперечному напрямку, досліджувалось розповсюдження осьової тріщини (група зразків маркувалась КО).

Діаграми деформування та руйнування  $P(t)$ . На рис. 3–6 представлено діаграми зміни зусилля від часу  $P(t)$ , отримані за результатами випробувань зразків обох груп. Видно (рис. 3), що за температури випробувань  $-80$  °С руйнування обох груп зразків має крихкий характер, при цьому енергія руйнування зразків з кільцевою тріщиною має вище значення, завдяки розвитку вторинної тріщини. При температурі випробувань  $0$  °С (рис. 4) відбувається крихке руйнування обох груп зразків, із чітко вираженою ділянкою в'язкого підростання тріщини, при цьому енергія руйнування зразків з осьовою тріщиною значно менша, аніж для зразків з кільцевою тріщиною. Згідно з рис. 5. за температури  $40$  °С зразки групи КО мають невелику ділянку крихкого проскоку тріщини, в той час, як зразки КК мають повністю в'язкий тип руйнування. За температури  $80$  °С обидві групи зразків мають в'язке руйнування.

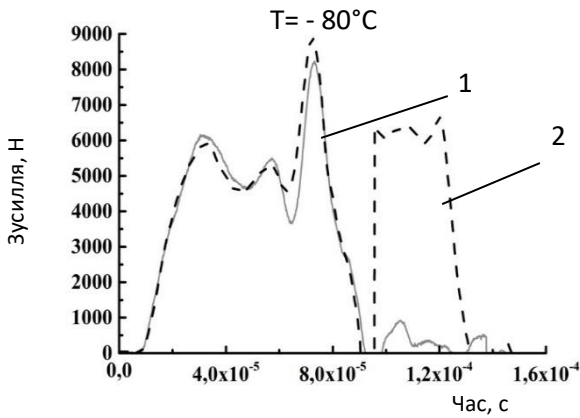


Рисунок 3 – Діаграми деформування зразків при температурі  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ : 1 – зразки групи КО, 2 – зразки групи КК

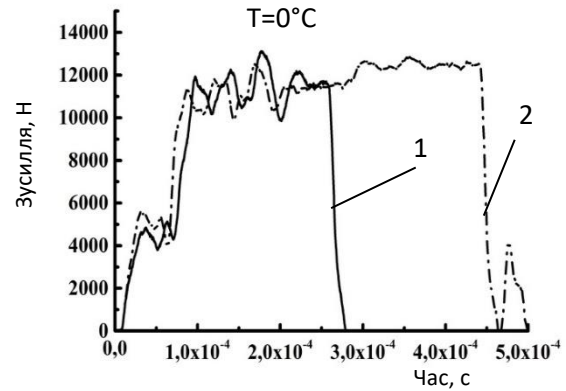


Рисунок 4 – Діаграми деформування зразків при температурі  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ : 1 – зразки групи КО, 2 – зразки групи КК

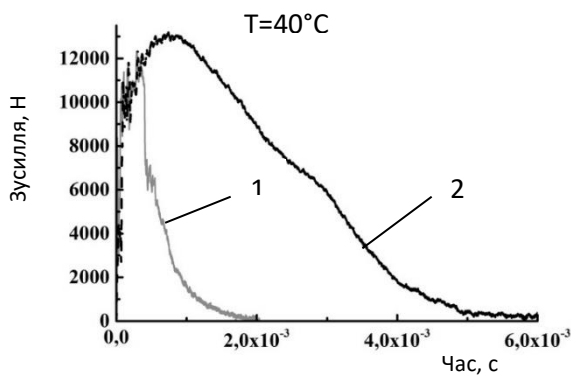


Рисунок 5 – Діаграми деформування зразків при температурі  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ : 1 – зразки групи КО, 2 – зразки групи КК

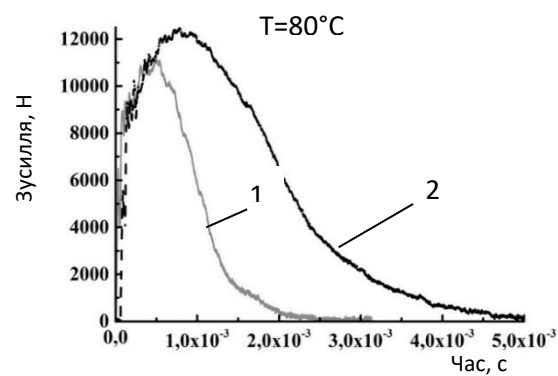


Рисунок 6 – Діаграми деформування зразків при температурі  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ : 1 – зразки групи КО, 2 – зразки групи КК

Визначення енергій деформування та руйнування. Характер руйнування зразків змінюється в залежності від температури випробувань та швидкості деформування. Висока чутливість системи реєстрації дозволяє розділити діаграму навантаження на характерні ділянки та розрахувати значення повної енергії деформування та руйнування  $E_t$  та її складових: енергії зародження тріщини  $E_{init}$ , енергії в'язкого підростання тріщини  $E_{d.c.g.}$ , енергії проскоку крихкої тріщини  $E_b$  та енергії в'язкого долому  $E_{d.r}$  (рис. 7) [8]. При цьому приймалось припущення, що зародження тріщини відбувається при  $P=P_{max}$ . Значення повної енергії деформування та руйнування та її складових визначались згідно стандарту ISO 14556 [6], що передбачає перетворення діаграми  $P(t)$  в  $P(s)$ .

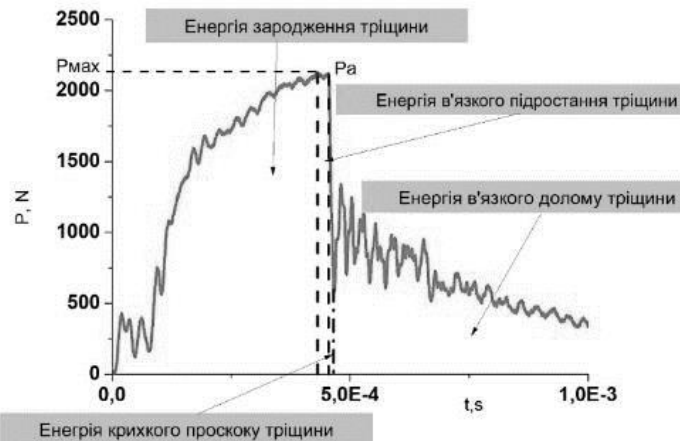


Рисунок 7 – Розділення діаграми навантаження  $P(t)$  на характерні ділянки

На рис. 8–11 наведено графіки температурних залежностей повної енергії та її складових для двох груп зразків. Для зразків групи КК спостерігаються більш високі енергії зародження тріщини, та енергії долому, як показано на рис. 8, 11. Енергія крихкого проскоку вища у зразків групи КО. Температурні залежності енергій крихкого проскоку мають немонотонний вигляд з максимумом при температурі біля 35 °С. Залежності енергії зародження тріщини мають верхній шельф, хоча для зразків типу КО спостерігається деяке вторинне підвищення рівня енергії при температурах вищих 75 °С. Для зразків групи КО спостерігаються більш високі енергії розповсюдження тріщини в зоні стабільного підростання та в зоні крихкого проскоку, як показано на рис. 9, 10.

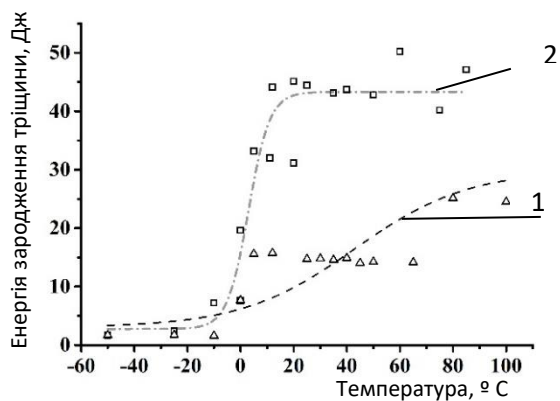


Рисунок 8 – Температурна залежність енергії зародження тріщини: 1 – зразки групи КО, 2 – зразки групи КК

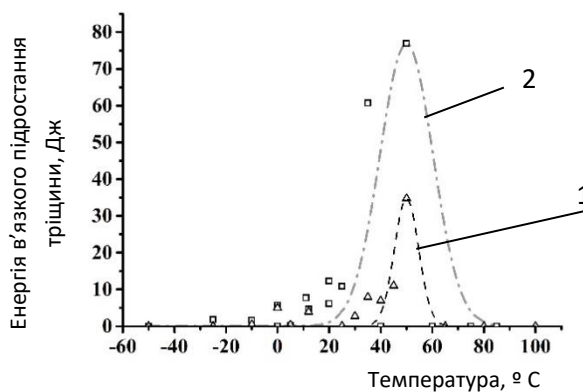


Рисунок 9 – Температурна залежність в'язкого підростання тріщини: 1 – зразки групи КО, 2 – зразки групи КК

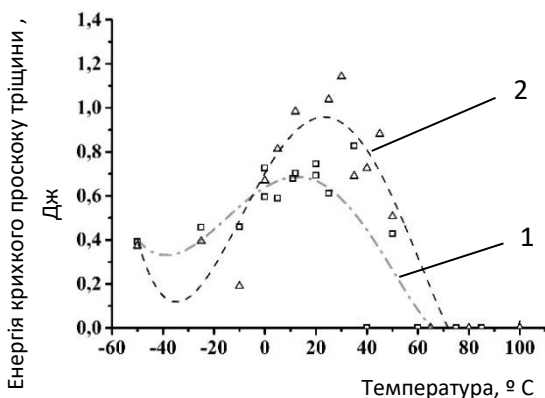


Рисунок 10 – Температурна залежність крихкого проскоку тріщини: 1 – зразки групи КО, 2 – зразки групи КК

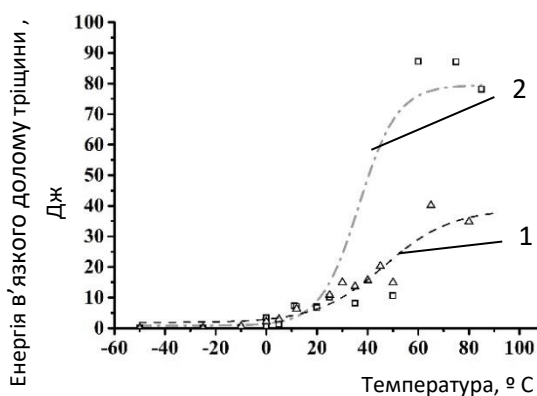


Рисунок 11 – Температурна залежність в'язкого долому тріщини: 1 – зразки групи КО, 2 – зразки групи КК

Діаграма температурної залежності енергії руйнування для стандартних зразків Шарпі, як і для всіх матеріалів з об'ємно центричною кубічною кристалічною решіткою (ОЦК) [9], має вигляд сигмоподібної кривої, з вираженим нижнім та верхнім шельфом. Як видно на рис. 12 енергії нижнього шельфу мають майже однакові значення, в той час як енергії верхнього шельфу мають значні відмінності. Так, енергія верхнього шельфу для зразків з кільцевою тріщиною має на 60 % вище значення ніж для зразків з осьовою тріщиною.

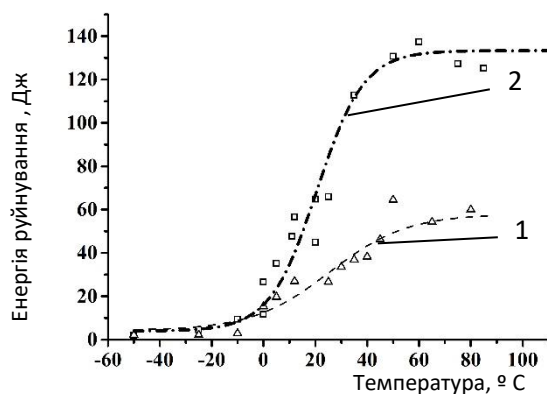


Рисунок 12 – Температурні залежності повної енергії руйнування: 1 – зразки групи КО, 2 – зразки групи КК

Фрактографічні дослідження. За результатами фрактографічних досліджень поверхонь зламу встановлено співвідношення між характерними зонами для двох типів зразків. На рис. 13–15 наведені графіки температурних залежностей часток характерних зон ламів зразків Шарпі. Частки площ зони стабільного підростання тріщини вищі у зразків групи КК, частки площ зон нестабільного проскоку тріщини та в'язкого долому практично рівні.

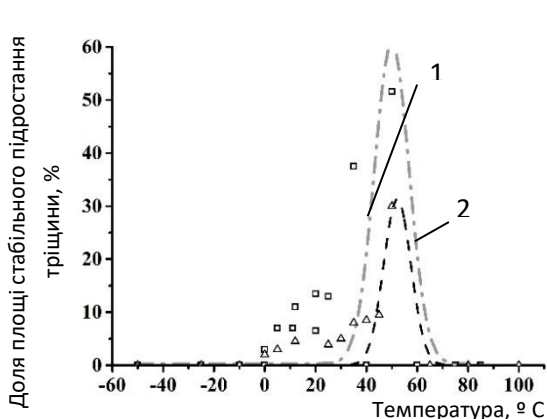


Рисунок 13 – Залежність частки площі стабільного в'язкого підростання тріщини зразка від температури: 1 – зразки групи КК, 2 – зразки групи КО

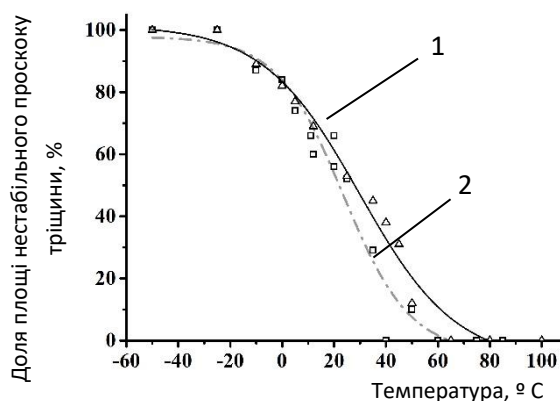


Рисунок 14 - Залежність частки площі нестабільного крихкого проскоку тріщини зразка від температури: 1 – зразки групи КК, 2 – зразки групи КО

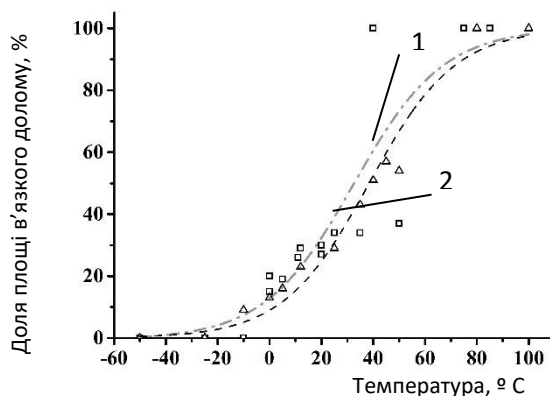


Рисунок 15 - Залежність частки площі стабільного в'язкого підростання тріщини зразка від температури: 1 – зразки групи КК, 2 – зразки групи КО



На фрактограмах поверхонь зламів, випробуваних при температурі 50 °С видно, що зона нестабільного крихкого проскоку у зразках групи КК (рис. 16) зміщена від надрізу по відношенню до зразків групи КО (рис. 17), при тому, що площі цих зон майже рівні.

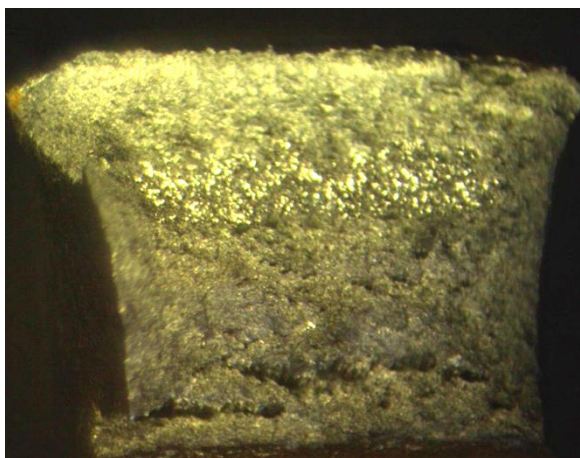


Рисунок 16 – Злам зразка зі сталі 22К з кільцевою орієнтацією концентратора (групи КК) при температурі 50 °С

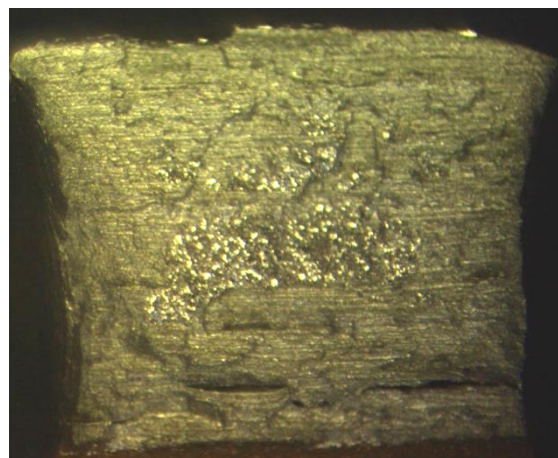


Рисунок 17 – Злам зразка зі сталі 22К з осьовою орієнтацією концентратора (групи КО) при температурі 50 °С

Визначення температури в'язко-крихкого переходу. На основі фрактографічних досліджень поверхонь зламів зразків обох груп проведено оцінку в'язкої складової зламів. За отриманими температурними залежностями в'язкої складової зламу зразка та енергії руйнування було оцінено критичну температуру крихкості, при якій частка в'язкої складової в зламі становить 50 % від усієї площі зламу  $T_k = T_{50\%}$  [9] (рис. 19). Для зразків, вирізаних у повздовжньому напрямку (група КК)  $T_{50\%} = 21,6$  °С. Для зразків, вирізаних у поперечному напрямку (група КО)  $T_{50\%} = 29,5$  °С.

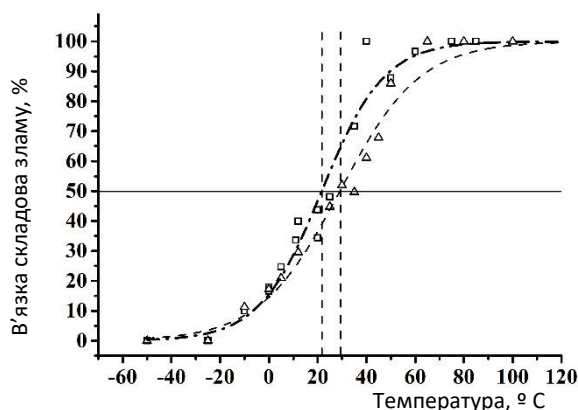


Рисунок 18 – Температурна залежність в'язкої частки зламу для двох груп зразків зі сталі 22К

Отже, для сталі 22К напрямок вирізання зразків Шарпі суттєво впливає на величину енергії руйнування зразків та її складових, та величину критичної температури крихкості.

### ВИСНОВКИ

1. Проведено ударні випробування стандартних зразків Шарпі зі сталі 22К, вирізаних у двох напрямках – повздовжньому та поперечному, при різних температурах на інструментованому вертикальному копрі. За результатами випробувань побудовано температурні залежності повної енергії деформування та руйнування та її складових.
2. За результатами фрактографічних досліджень отримано температурні залежності часток характерних зон зламів для двох груп зразків Шарпі та проведено їх порівняння
3. Показано, що напрямок вирізання зразків Шарпі суттєво впливає на величину енергії руйнування зразків та її складових, та величину критичної температури крихкості для сталі 22К.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Антикайн П. А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов : 3-е изд., перераб. / П. А. Антикайн. – М. : Энергоатомиздат, 1990.
2. Красовский А. Я. Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов / А. Я. Красовский, В. Н. Краси́ко. Киев : Наук. думка. 1990.
3. Работоспособность трубопроводов: Сопrotивляемость разрушению. / Г. А. Ланчаков, Е. Е. Зорин, Ю. И. Пашков, А. И. Степаненко. – М. : Недра-Бизнесцентр, 2001. – Ч. 2.
4. Инструментированный копер для ударных испытаний: основные элементы, анализ работоспособности / В. В. Харченко, Е. А. Кондряков, В. Н. Жмака, А. А. Бабуцкий // Надёжность и долговечность машин и сооружений. – 2006. – № 27. – С. 121–130.
5. Система измерения деформаций и усилий при динамических испытаниях / Е. А. Кондряков, В. Н. Жмака, В. В. Харченко [и др.] // Проблемы прочности. – 2005. – № 3. – С. 140–146.
6. ISO 14556. Steel Charpy V-Notch Pendulum Impact Test – Instrumented Test Method. 05.01.2005.
7. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. Введ. 01.01.79.
8. Влияние температуры и скорости нагружения на энергию зарождения и распространения трещин в образцах Шарпи из углеродистых сталей / В. В. Харченко, Е. А. Кондряков, В. Н. Жмака [и др.] // Проблемы прочности. – 2006. – № 5. – С. 120–127.
9. Горицкий В. М. Диагностика металлов / В. М. Горицкий. – М. : Metallurgizdat, 2004.

## REFERENCES

1. Antikayn P.A./ Metallyi i raschet na prochnost kotlov i truboprovodov – 3-e izd., pererab. – M.: 1990.
2. Krasovskyy, A.J., Krasyyko, V.N./ Treschynostoykosti stalei mahystralnyh truboprovodov, - Science. Dumka, Kyiv, Ukraine. 1990
3. Lanchakov G.A./ Rabotosposobnost truboprovodov: v 3-h ch. 2001.- Ch. 2. Soprotivlyaemost razrusheniyyu. //Zorin E.E., Pashkov Yu. I., Stepanenko A.I - 350 s.: il. M. Nedra-Biznessentr., [in Russian].
4. Kharchenko V.V./ Instrumentirovannyiy koper dlya udarnyih ispytaniy: osnovnyie elementy, analiz rabotosposobnosti, //Kondryakov E.A., Zhmaka V.N., Babutskiy A.A., - NadYozhnost i dolgovechnost mashin i sooruzheniy. – 2006. - 27. - P. 121-130., [in Russian].
5. Kondryakov E. A., /Sistema izmereniya deformatsiy i usiliy pri dinamicheskikh ispytaniyakh//, Zhmaka V. N., Kharchenko V. V. et al. - Problemyi prochnosti., - 2005.- 3. - P. 140 - 146 [in Russian].
6. ISO 14556. Steel Charpy V-Notch Pendulum Impact Test – Instrumented Test Method. - 05.01.2005. [in English].
7. GOST 9454-78. Metallyi. Metod ispytaniya na udarnyy izgib pri ponizhennyih, komnatnoy i povyishennyih temperaturah. - Vved. 01.01.79., [in Russian].
8. Kharchenko V. V. / Vliyanie temperatury i skorosti nagruzheniya na energiyu zarozhdeniya i rasprostraneniya treschin v obraztsah Sharpi iz uglerodistyih staley.// Kondryakov E. A., Zhmaka V. N., Babutskiy A. A., Babutskiy A. I. - ISSN 0556-171X. Problemyi prochnosti, 2006, № 5. – P. 120-127 [in Russian].
9. Goritskiy V.M., /Dyagnostika metallov [Text],- M. “Metallurgizdat”, 2004. – 408p. [in Russian].

**А. В. Кравчук<sup>1</sup>, Є. О. Кондряков<sup>1</sup>, О. В. Панасенко<sup>1</sup>, В. В. Харченко<sup>1</sup>**

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОРІЄНТАЦІЇ КОНЦЕНТРАТОРА ВІДНОСНО ОСІ ТРУБОПРОВОДУ НА СКЛАДОВІ ЕНЕРГІЇ РУЙНУВАННЯ ТА ТЕМПЕРАТУРУ В'ЯЗКО-КРИХКОГО ПЕРЕХОДУ ЗРАЗКІВ ШАРПІ ЗІ СТАЛІ 22К**

<sup>1</sup>Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, м. Київ, Україна

На інструментованому вертикальному копрі при різних температурах проведено ударні випробування стандартних зразків Шарпі зі сталі 22К, вирізаних у двох напрямках – повздовжньому та поперечному. За результатами випробувань побудовано температурні залежності повної енергії

деформування та руйнування та її складових. За результатами фрактографічних досліджень отримано температурні залежності часток характерних зон зламів для двох груп зразків Шарпі та проведено їх порівняння. Визначено температури в'язко-крихкого переходу.

**Ключові слова:** Зразок Шарпі, напрямок вирізання, енергія деформування та руйнування, температура в'язко-крихкого переходу.

*Кравчук Андрій Васильович*, молодший науковий співробітник відділу чисельних і експериментальних методів дослідження конструкційної міцності, Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, e-mail: kravchuk.a@ipp.kiev.ua

*Кондряков Євгеній Олександрович*, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу чисельних і експериментальних методів дослідження конструкційної міцності, Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України

*Панасенко Олександр В'ячеславович*, молодший науковий співробітник відділу чисельних і експериментальних методів дослідження конструкційної міцності, Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України

*Харченко Валерій Володимирович*, член-корр. НАН України, директор Інституту проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України

**A. Kravchuk<sup>1</sup>, E. Kondryakov<sup>1</sup>, O. Panasenko<sup>1</sup>, V. Kharchenko<sup>1</sup>**

## **STUDY OF THE INFLUENCE OF THE CONCENTRATOR ORIENTATION RELATIVE TO THE PIPELINE AXIS ON THE COMPONENTS OF THE FRACTURE ENERGY AND THE DUCTILE-BRITTLE TRANSITION TEMPERATURE OF THE OF THE SHARPY SPECIMENS FROM THE STEEL 22K**

<sup>1</sup>G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength, Kyiv

The world experience shows, that the standard basis available in Ukraine needs improvements for more correct interpreting of strength and durability of the power-station 1-st contour elements. Nowadays different numerical and experimental methods are being developed and improved for solving the problems of broadening the power-stations equipment operation life looking for the additional spare strength.

While calculating the brittle fracture resistance it is necessary to know the value of the critical brittleness temperature  $T_{k0}$  of the material in the initial state in order to build the curve of the permissible values of the stress intensity factor (SIF). Usually  $T_{k0}$  is found according to the results of the impact tests of the Charpy specimens, the methods of finding  $T_{k0}$  and other factors affecting the value of  $T_{k0}$  being of special attention nowadays. The result of the bending tests of the specimens with concentrators differ from those cut in the longitudinal and transversive directions. That is why the investigation of the effect of the cutting direction of the Sharpy specimens and the cut orientation on the results of the impact tests, as well as the determination of the critical brittleness temperature, are the pressing problems.

Charpy specimens impact tests are one of more simple and inexpensive method to determine the mechanical properties of materials. The results of these tests can be used to estimate the strength and durability of large-scale structures. A series of Charpy specimens impact test from high-alloyed high-temperature resistant steel 22K were carried out in the temperature range of  $-50 \div +100^\circ\text{C}$  with control of rolling direction. Tests were conducted on instrumented vertical impact machine, which can record a full diagram of specimen's deformation and fracture. The values of total energy of deformation and fracture and its components: energy of crack initiation, energy of ductile crack growth, brittle cracks energy and ductile rupture energy were determined. It was found, that ductile-brittle transition temperature for specimens cuted along the rolling direction (group KK) higher than for specimens of group KO. It is shown, that the direction of rolling Charpy specimens significantly influences the values of total energy of deformation and fracture and its components, and the values of the ductile-brittle transition temperature for 22K steel.

**Key words:** Charpy specimen, rolled direction, energy of deformation and fracture ductile-brittle transition temperature.



*Kravchuk Andriy*, Junior Researcher Numerical and Experimental Methods for Structural Strength Analysis G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine e-mail: [kravchuk.a@ipp.kiev.ua](mailto:kravchuk.a@ipp.kiev.ua)

*Kondryakov Ievgen*, Ph.D., Senior Researcher Numerical and Experimental Methods for Structural Strength Analysis G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine

*Panasenko Oleksandr*, Junior Researcher Numerical and Experimental Methods for Structural Strength Analysis G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine

*Kharchenko Valeriy*, Corresponding member NAS of Ukraine, Director of the Institute of Problems of Strength named after G. S. Pisarenko National Academy of Sciences of Ukraine

**А. В. Кравчук<sup>1</sup>, Е. А. Кондряков<sup>1</sup>, А. В. Панасенко<sup>1</sup>, В. В. Харченко<sup>1</sup>**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОРИЕНТАЦИИ КОНЦЕНТРАТОРА  
ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ ТРУБОПРОВОДА НА СОСТАВЛЯЮЩИЕ ЭНЕРГИИ  
РАЗРУШЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРУ ВЯЗКО-ХРУПКОГО ПЕРЕХОДА ОРАЗЦОВ  
ШАРПИ ИЗ СТАЛИ 22К**

<sup>1</sup>Институт проблем прочности имени Г. С. Писаренко НАН Украины, г. Киев

Проведено ударные испытания стандартных образцов Шарпи из стали 22К, вырезанных в двух направлениях – продольном и поперечном, при разных температурах на инструментированном вертикальном копре. По результатам испытаний построены температурные зависимости полной энергии деформирования и разрушения и ее составляющих. По результатам фрактографических исследований получены температурные зависимости долей характерных зон изломов для двух групп образцов и проведено их сравнение. Определены температуры вязко-хрупкого перехода.

**Ключевые слова:** Образец Шарпи, направление вырезки, энергия деформирования и разрушения, температура вязко-хрупкого перехода.

*Кравчук Андрей Васильевич*, младший научный сотрудник отдела численных и экспериментальных методов исследований конструкционной прочности, Институт проблем прочности имени Г. С. Писаренко НАН Украины, e-mail: [kravchuk.a@ipp.kiev.ua](mailto:kravchuk.a@ipp.kiev.ua)

*Кондряков Евгений Александрович*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела численных и экспериментальных методов исследований конструкционной прочности, Институт проблем прочности имени Г. С. Писаренко НАН Украины

*Панасенко Александр Вячеславович*, младший научный сотрудник отдела численных и экспериментальных методов исследований конструкционной прочности, Институт проблем прочности имени Г. С. Писаренко НАН Украины

*Харченко Валерий Владимирович*, член-корр. НАН Украины, директор Института проблем прочности имени Г. С. Писаренко НАН Украины