

*Степан ШТАЮРА<sup>1</sup>, Наталія ШТАЮРА<sup>2</sup>*

## **АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВОДНЮ НА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕРЕДНЬОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ**

<sup>1</sup> *Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України,  
79060, м. Львів, вул. Наукова, 5*

<sup>2</sup> *Львівський національний університет імені Івана Франка  
79000, м. Львів, вул. Університетська, 1. E-mail: dep-12@ipm.lviv.ua*

*Stepan SHTAYURA, Nanaliya SHTAYURA*

## **ANALYSIS OF HYDROGEN INFLUENCE ON MECHANICAL CHARACTERISTICS OF MIDDLE CARBON STEELS**

<sup>1</sup> *Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Science of Ukraine  
5, Naukova Str., Lviv, 79060, Ukraine*

<sup>2</sup> *Ivan Franko National University of Lviv  
1, Universytetska Str., Lviv, 79000, Ukraine. E-mail: dep-12@ipm.lviv.ua*

### **ABSTRACT**

Hydrogen influence on mechanical properties of the steels 20, 40Cr, steel 65Mn at the different structural states (delivery state, after normalization, annealing and quenching with tempering at 520 and 590°C) is investigated. The stress-strain curves of the steels in true coordinates on air and in hydrogen at pressure 100 atm are built. It is determined that the strength characteristics ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_t$ ) of 20, 40X, 65G steels due to hydrogen action alter within deviation of experimental data (2...3%). It was found that the most sensitive to the hydrogen action is the relative reduction and the true fracture stress, which for all steels varies within 8...10% and 5...32%, respectively. It is shown that the rate of change in the narrowing in the sample in hydrogen compared with air decreases for the investigated steels by 20...30%. This indicates the plastic deformations localization and the dislocation motion blocking by hydrogen.

**KEY WORDS:** *mechanical characteristics, 65Г steel, 40X steel, steel 20, hydrogen, fracture diagram, speed of deformation.*

### **ВСТУП**

Значна кількість елементів конструкцій енергетичного обладнання працює під навантаженням у воденьвмісних середовищах, що призводить до передчасного руйнування елементів чи конструкції в цілому. З метою передбачення руйнування вибір матеріалу при проектуванні проводять з урахуванням впливу водню на характеристики матеріалу за робочих режимів експлуатації конструкції.

Відомо [1–3], що водень змінює фізико-механічні характеристики сталей. Його дія значно посилюється за наявності концентраторів напружень і тріщин. Особливо вплив водню різної концентрації на міцність і пластичність сталей помітний у пластичній зоні за високих рівнів навантажень. З метою встановлення впливу водню на фізико-механічні характеристики матеріалу розроблено методика, яка базується на силовій схемі розтягу циліндричного зразка [4] у камері високого тиску.

**Мета роботи** – встановити вплив водню на механічні характеристики середньовуглецевих сталей за різних структурних станів.

### **ЗРАЗКИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ**

Для встановлення впливу водню різної концентрації на матеріал елементів конструкцій досліджували середньовуглецеві сталі з вмістом вуглецю від 0,2 до 0,6 %: сталь 20, сталь 40X та

сталь 65Г за різних структурних станів (поставка, нормалізація, відпал та гартування з відпуском 520°C і 590°C) [5]. Механічні характеристики сталей визначали на гладких зразках довжиною  $l_0 = 10 \cdot d_0$  кругового перерізу типу IV згідно ГОСТ 1497-84 (рис. 1). Зразки виготовляли із листової сталі (65Г) та з прутка (40Х, сталь 20), враховуючи вимоги стандарту щодо місця вирізки із заготовки, режимів різання і охолодження. Зразки зі сталі 40Х та сталі 20 виготовляли діаметром 10 mm і довжиною робочої частини – 100 mm і захватною частиною – М16. Зразки із сталі 65Г – діаметром 5 mm,  $l_0$  – 50 mm, захватною частиною – М12.

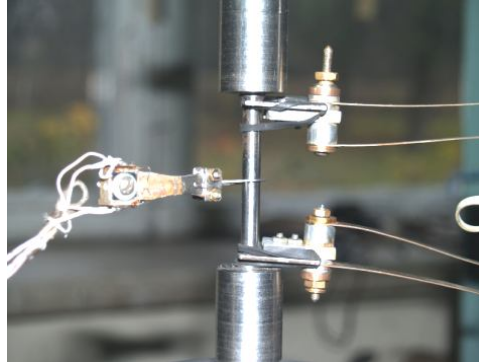


Рис. 1. Циліндричний зразок для випробувань розтяганням  $p$  тензодавачами для вимірювання видовження та звуження.

Fig. 1. Cylindrical sample for testing with strain grips for elongation and narrowing measuring.

Характеристики міцності та пластичності досліджуваних сталей визначали на розривній машині FP-100 за методикою [5], використовуючи індуктивний динамометр для вимірювання статичного зусилля та тензометричні двоконсольні давачі зміщень з базою, яке дорівнює робочій довжині зразка – для розтягу і діаметра – для звуження.

Зміну силового параметра (навантаження  $P$ ), геометричних розмірів робочої ділянки зразка (видовження робочої частини  $\Delta l$  та звуження зразка  $\Delta d$ ), характеристики міцності (границю текучості  $\sigma_{0.2}$ , границю міцності  $\sigma_B$ ) та пластичності (відносне видовження  $\delta$ ; відносне звуження  $\psi$ , істинне напруження розриву  $S_k$ ) реєстрували на ПК, застосовуючи вимірювальну систему, яка складається із аналого-цифрового перетворювача АЦП, підсилювачів, тензометрів, блока живлення давачів та програмного забезпечення, яка дозволяє в реальному часі фіксувати зміну вимірюваних параметрів та будувати діаграми їх взаємозалежності.

Наводнювання зразків та дослідження впливу водню на механічні характеристики сталей проводили в камері високого тиску (рис. 2). Після наповнення воднем камеру із зразком поміщали в піч і нагрівали до температури 350 °С протягом 4 h, контролюючи тиск манометром. Після цього камеру виймали з печі, охолоджували до кімнатної температури і встановлювали у захоплювачі машини для випробувань [5].



Рис. 2. Установка з камерою для випробувань зразків розтяганням у водні.

Fig. 2. Machine with a chamber for testing samples under tension in hydrogen.

Розрахунок характеристик міцності і пластичності [4] за отриманими з використанням АЦП та відповідного програмного забезпечення істинними діаграмами руйнування “істинні напруження  $S$  – звуження  $\Psi$ ”, істинні напруження  $S$  – видовження  $\delta$ ”, проводили із урахуванням попереднього навантаження зразка від дії тиску водню у камері та зменшення параметрів тиску у момент досягнення розривного зусилля, вводячи відповідні поправки до значень отриманих характеристик.

Враховуючи істинні розміри зразка в процесі навантаження, отриману діаграму  $P-\Delta l$ ,  $P-\Delta d$  перебудовували в істинних координатах ( $S-\delta$ ,  $S-\Psi$ ), що дає більш наглядну картину поведінки матеріалу під час руйнування і встановлює істинні параметри напруження і деформації.

Діаграми деформування в умовних та в істинних координатах представлено на рис. 3–5. Результати розрахунків механічних характеристик і характеристик пластичності сталей 20, 40Х, 65Г (поставка, нормалізація, відпал, гартування з відпуском 520°C та 590°C) наведено в табл. 1.

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

У результаті випробовувань сталі 20, сталі 40Х та сталі 65Г за різних структурних станів (стан поставки, нормалізація, відпал та гартування з відпуском 520°C і 590°C) на повітрі та за дії водню за тиску 100 атм визначили умовні та істинні характеристики міцності і пластичності. З діаграм руйнування видно, що характеристики міцності  $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$  за дії водню змінюються незначно (рис. 3а–5а). Відносне звуження  $\Psi_k$  та істинне напруження  $S_k$  змінюються на значно більшу величину для сталі 20, сталі 40Х та усіх структурних станів сталі 65Г (рис. 3б–4б), що вказує на те, що найбільший вплив водню на фізико-механічні характеристики матеріалу відбувається за високих рівнів напружень та деформацій у шийці зразка.

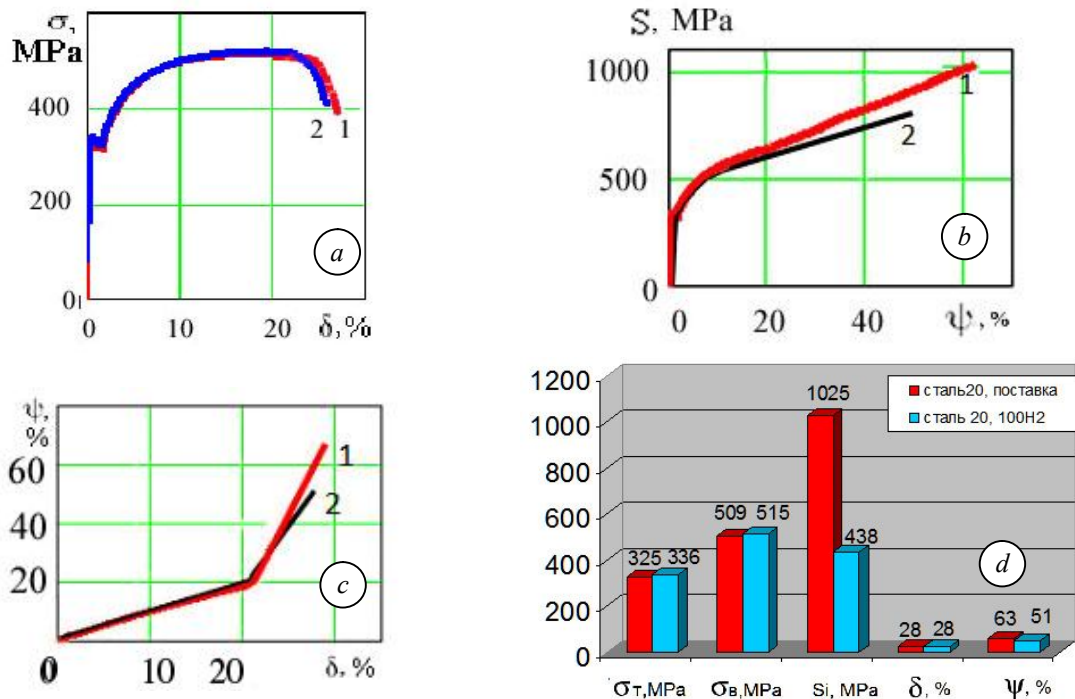


Рис. 3. Діаграми деформування сталі 20 на повітрі (1) та у водні (2) (100 атм): а)  $\sigma - \delta$ ; б)  $S - \Psi$ ; в)  $\Psi - \delta$ ; д) гістограми механічних характеристик.

Fig. 3. Deformation diagrams of 20 steel in air (1) and in hydrogen (2). а)  $\sigma - \delta$ ; б)  $S - \Psi$ ; в)  $\Psi - \delta$ ; д) histograms of mechanical characteristics.

За результатами досліджень встановлено, що для сталі 65Г в усіх структурних станах водень підвищує границі течіння  $\sigma_T$  та міцності  $\sigma_B$  на 3...5% порівняно з повітрям, а відносне видовження  $\delta$  зменшується у межах 10...13%. Найчутливіші до його дії відносно звуження та істинне напруження руйнування  $S_k$ . Для стану поставки сталі 65Г водень знижує відносне звуження  $\Psi_k$  та істинне напруження розриву  $S_k$ , на 32% та 8%; для нормалізованого стану – на

26% та 8 %, для відпущеного за 520°C – на 24% і 10%, а за 590°C – на 5% і 12% відповідно (рис. 5).

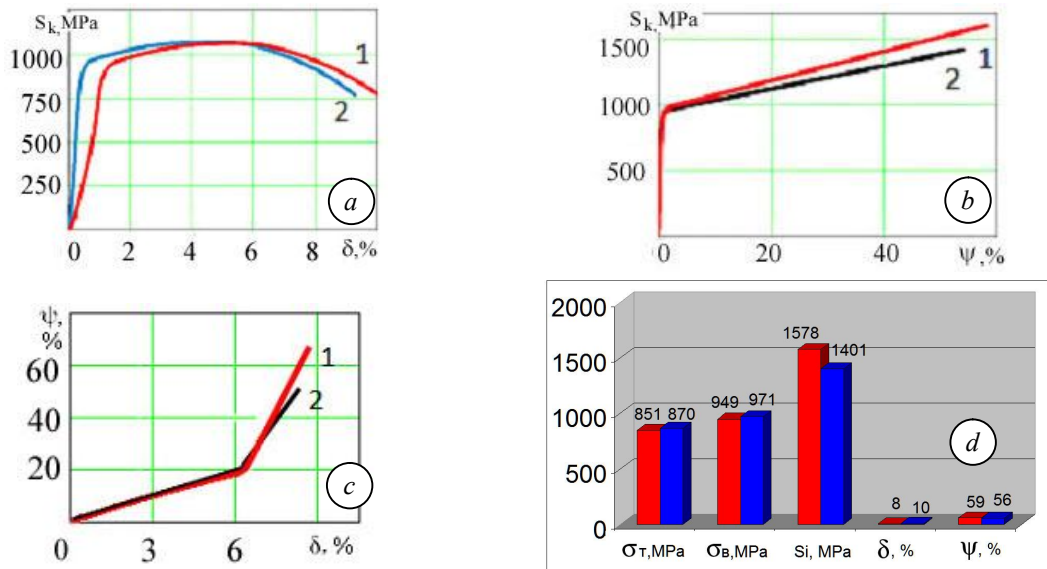


Рис. 4. Діаграми деформування сталі 40Х на повітрі (1) та у водні (2) (100 атм):  
а)  $\sigma - \delta$ ; б)  $S - \Psi$ ; в)  $\Psi - \delta$ ; д) гістограми механічних характеристик.

Fig. 4. Deformation diagrams of 40Cr steel in air (1) and in hydrogen (2):  
а)  $\sigma - \delta$ ; б)  $S - \Psi$ ; в)  $\Psi - \delta$ ; д) histograms of mechanical characteristics.

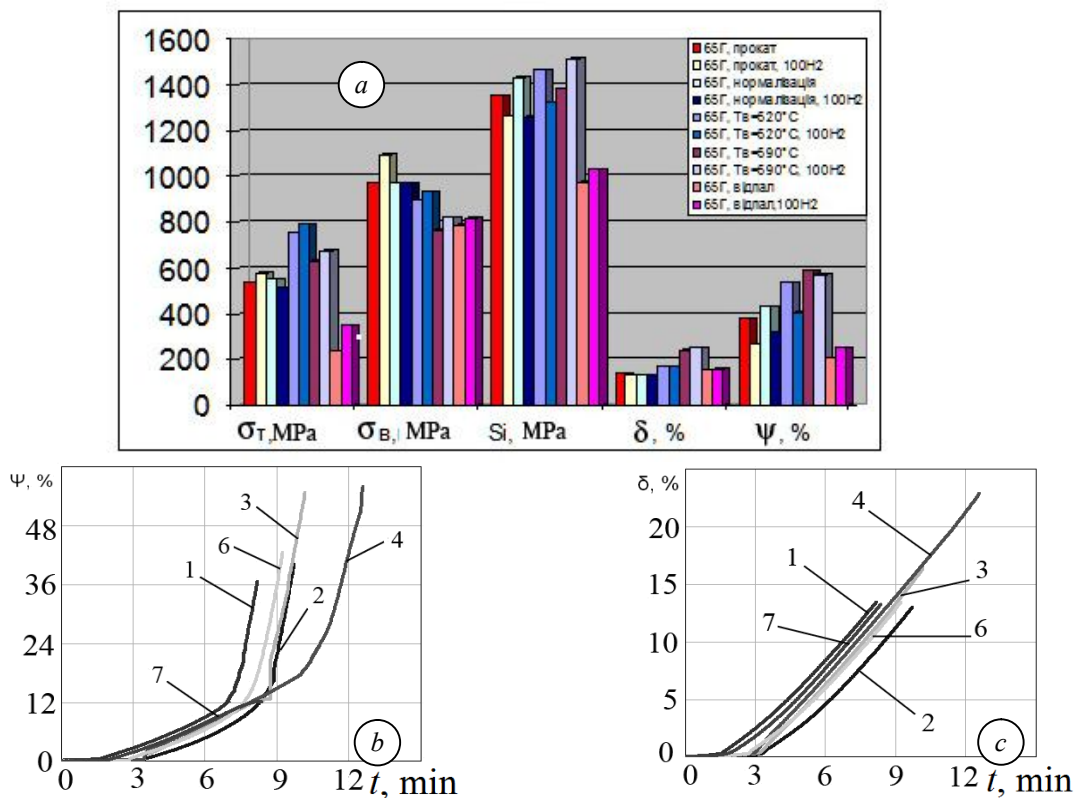


Рис. 5. Гістограми (а) та діаграми деформування сталі 65Г на повітрі (b, c) та у водні (100 атм):

б) 1, 2 – поставка; 3 –  $T_B = 520^\circ\text{C}$ ; 4 –  $T_B = 590^\circ\text{C}$ ; 6 – нормалізація; 7 – відпал.

в) 1, 2 – поставка; 3 –  $T_B = 520^\circ\text{C}$ ; 4 –  $T_B = 590^\circ\text{C}$ ; 6 – нормалізація; 7 – відпал.

Fig. 5. Histograms and deformation diagrams of 65Mn steel in air (b, c) and in hydrogen (a).

б) 1, 2 – delivery state, 3 –  $T_B = 520^\circ\text{C}$ ; 4 –  $T_B = 590^\circ\text{C}$ ; 6 – normalization, 7 – annealing.

в) 1, 2 – delivery state, 3 –  $T_B = 520^\circ\text{C}$ ; 4 –  $T_B = 590^\circ\text{C}$ ; 6 – normalization, 7 – annealing;

Таблиця 1. Характеристики міцності та пластичності сталей на повітрі та у водні (100 атм)

Table 1. Strength and plasticity characteristics of steels in air and in hydrogen (100 atm)

Матеріал	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$S_k$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Сталь 20, поставка	330	510	1030	29	63
Сталь 20, H2 100 atm	340	520	830	26	51
40X поставка	850	950	1580	10	59
40X, H2 100 atm	860	950	1400	9	54
40X, 400 C	490	790	1600	6	60
40X, 400 C, H2 100 atm	50	790	1350	5	57
65Г, прокат	540	970	1350	14	38
65Г, прокат, H2 100 atm	560	1000	1260	13	26
65Г, $T_B=520^\circ C$	760	890	1470	17	54
65Г, $T_B=520^\circ C$ , H2 100 atm	800	930	1320	14	41
65Г, $T_B=590^\circ C$	630	770	1380	24	59
65Г, $T_B=590^\circ C$ , H2 100 atm	630	760	1300	21	56
65Г, нормалізація	550	970	1430	13	43
65Г, нормалізація, H2 100 atm	520	970	1260	12	32

За результатами аналізу діаграм сталі 20 та сталі 40X, отриманих на повітрі і у водні, встановлено, що характеристики міцності цих сталей під дією водню збільшуються на 2-3 %, а відносно звуження зменшується на 8...10 %. Чутливішими до дії водню є істинні напруження, які для сталі 20 зменшуються на 19%, для сталі 40X (поставка) – на 8%, для 40X (400°C) – на 17%. Характеристика пластичності  $\Psi_K$  для сталі 20 зменшується на 19%, а для 40X – на 8 % (поставка) та на 5% (відпуск 400°C).

У результаті аналізу встановлено, що водень практично не змінює відношення  $\frac{\sigma_B}{\sigma_T}$ , яке становить: 1,8 – для сталі 65Г (поставка) і 1,2 – для 65Г (нормалізація, 1,1 – для 40X (поставка), 1,6 – для 40X (400°C), 1,5 – для сталі 20.

За результатами аналізу геометрії шийки зразка встановлено, що у різні періоди деформування зміна видовження і звуження зразка відбувається непропорційно. До досягнення границі течіння, коли справедливий закон Гука, швидкість зміни відносного видовження  $U_\delta$  і швидкість зміни відносного звуження  $U_\psi$  є пропорційними. На ділянці зміцнення ( $\sigma_T$  -  $\sigma_B$ ) швидкість зміни цих параметрів значно зростає, залишаючись пропорційною (рис. 6). Причому, якщо  $X_d$  при досягненні границі міцності продовжує зростати рівномірно, то  $U_\psi$  значно зростає і пропорційність порушується. За наявності водню величина  $U_\delta$  у шийці зразка (до розриву) не змінюється в порівнянні з повітрям, а  $U_\psi$  є значно нижчою, ніж на повітрі. Так для сталі 20 швидкість зміни відносного звуження  $U_\psi$  у водні є на 30% нижчою, ніж на повітрі, для сталі 40X – на 17%, а для сталі 65Г у стані поставки – на 25%. (табл. 2).

Таблиця 2. Швидкість зміни характеристик пластичності у шийці зразка

Table 2. Speed of plasticity characteristics changing in the specimen neck

Матеріал	Повітря/Водень (100 МПа)	
	$U_\delta$ , %/min	$U_\psi$ , %/min
Сталь 20	1,1/ 1,1	13/9
40X	1,2/1,2	18/15
65Г	2,5/2,2	25/20

Це явище вказує на локалізацію пластичних деформацій внаслідок дії водню, а також на блокування руху дислокацій воднем.

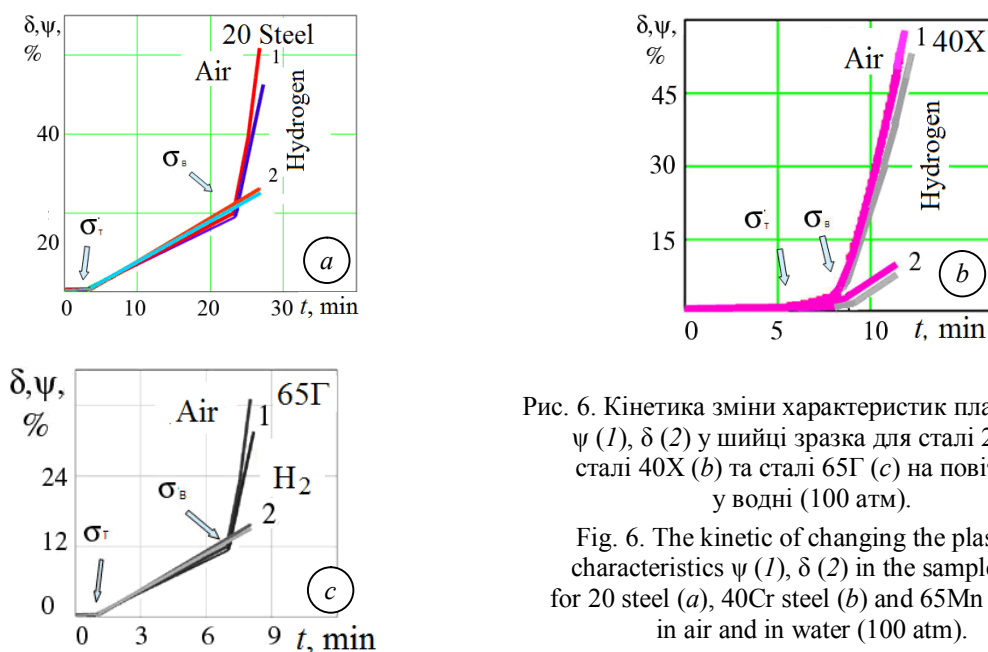


Рис. 6. Кінетика зміни характеристик пластичності  $\psi$  (1),  $\delta$  (2) у шийці зразка для сталі 20 (а), сталі 40Х (b) та сталі 65Г (c) на повітрі та у водні (100 атм).

Fig. 6. The kinetic of changing the plasticity characteristics  $\psi$  (1),  $\delta$  (2) in the sample neck for 20 steel (a), 40Cr steel (b) and 65Mn steel (c) in air and in water (100 atm).

### ВИСНОВКИ

1. За результатами досліджень встановлено, що для сталі 20, сталі 40Х та сталі 65Г в усіх структурних станах водень підвищує границю течіння  $\sigma_T$  та границю міцності  $\sigma_B$  на 3...5% порівняно з повітрям, а відносне видовження  $\delta$  зменшує у межах 10...13 %.
2. Найчутливішими до дії водню є відносне звуження та істинне напруження руйнування  $S_k$ . Для сталі 20 та 40Х (поставка) водень знижує істинне напруження розриву  $S_k$  та відносне звуження  $\Psi_k$  на 19 % та 8 % відповідно. Для стану поставки сталі 65Г – на 32% та 8%; для нормалізованого стану – на 26% та 8 %, для відпущеного за 520°C – на 24% і 10%, а за 590°C – на 5% і 12% відповідно.
3. Показано, що водень практично не змінює відношення  $\frac{\sigma_B}{\sigma_T}$ , яке становить: 1,8 – для сталі 65Г (поставка) і 1,2 – для 65Г (нормалізація), 1,1 – для 40Х (поставка), 1,6 – для 40Х (400°C), 1,5 – для сталі 20.
4. Показано, що швидкість зміни поперечного звуження шийки зразка у водні порівняно з повітрям зменшується для сталі 20 – на 31 %, для сталі 40Х – на 17%, для сталі 65Г – на 20%, що вказує на локалізацію пластичних деформацій і блокування руху дислокацій воднем.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Шаповалов В.И. Влияние водовода на структуру и свойства низкоуглеродистых сплавов. –М.: Металлургия, 1982. – 232 с.
2. Гельд П.В, Рябов Р.А. Водород в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1974. –272 с.
3. Галактионова Н.Л. Водород в металлах. – М.: Металлургия, 1967. – 303с.
4. ГОСТ 1497-84 /СТ СЭВ 471-77 / Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М: Изд. стандартов, 1985. – 40 с.
5. Штаюра С., Костів Р., Вергун І., Штаюра О. Вплив водню на механічні властивості сталі 65Г // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – Спецвип. № 9, Т.1, – С. 159–163.