УДК 670.191.33

ВПЛИВ ЛАЗЕРНОЇ УДАРНО-ХВИЛЬОВОЇ ОБРОБКИ НА УДАРНУ В'ЯЗКІСТЬ ТЕПЛОТРИВКИХ СТАЛЕЙ

П. В. ЯСНІЙ, П. О. МАРУЩАК, Ю. М. НІКІФОРОВ, В. Б. ГЛАДЬО, Б. П. КОВАЛЮК

Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя

Досліджено вплив опромінювання в прозорому конденсованому середовищі на ударну в'язкість теплотривких сталей. Опромінення зразка попереду концентратора спричиняє значне (до двох разів) підвищення ударної в'язкості сталі 15Х13МФ. Методом фрактографічного аналізу встановлено, що сталь зруйнувалась за внутрішньозеренним механізмом незалежно від схеми опромінювання. Обгрунтовано зростання ударної в'язкості матеріалу після ударно-хвильової обробки.

Ключові слова: *ударна в'язкість, лазерна ударно-хвильова обробка, опромінювання.*

Модифікування поверхневих шарів роликів машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) – один з найперспективніших методів підвищення ресурсу конструкції [1, 2]. Лазерна ударно-хвильова обробка змінює властивості матеріалу поверхні через тепловий вплив і напружено-деформований стан ділянок матеріалу приповерхневих шарів [3–6]. Використовуючи імпульсну лазерну обробку, можна локально нагрівати приповерхневий шар матеріалів до високої температури за малі проміжки часу, створюючи ділянки залишкових напружень і змінюючи структуру матеріалу на мікро- та мезорівнях [5, 6]. Проте властивості поверхні сталей після лазерного впливу залежать від початкової структури матеріалу і можуть суттєво відрізнятись за певних режимів.

Нижче досліджено вплив лазерної ударно-хвильової обробки на ударну в'язкість матеріалів роликів МБЛЗ ферито-перлітного та ферито-мартенситного класів.

Методика досліджень. Ударну в'язкість визначали на монометалевих зразках Шарпі зі сталей 15Х13МФ і 25Х1М1Ф та біметалевих зі сталей 18Х11МНФБ і 35Г2 за однакової товщини шарів. Випробовували на копрі типу ВКМ-5 при 20°С. Розміри зразків 5×5×27,5 mm, радіус надрізу 0,125 ± 0,0125 mm. Злами досліджували на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106И. Зразки обробляли лазером типу ГОС-1001 з пасивним затвором LIF у режимі модульованої добротності з генерацією ударних хвиль.

Тиск ударної хвилі на поверхню зразка оцінювали за формулою [7]

$$P = \left[I_0 \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \right) \frac{\rho_1 u_1 \rho_2 u_2}{\rho_1 u_1 + \rho_2 u_2} \right]^{1/2},$$

де I_0 – потужність лазерного випромінювання; γ – ефективний показник адіабати утвореної плазми; $\rho_1 u_1$ та $\rho_2 u_2$ – ударні імпеданси конденсованого та поглинального середовищ; ρ – густина речовини; u – швидкість ударної хвилі. Розлітання плазми і випаровування з поверхні обмежували прозорим конденсованим середовищем (ПКС), що забезпечує тиск P = 2 GPa [7]. Використали дві схеми обробки (рис. 1). Густина потоку $I_0 = 5 \cdot 10^8 – 2 \cdot 10^9$ W/cm^2.

Контактна особа: П. О. МАРУЩАК, e-mail: maruschak.tu.edu@gmail.com

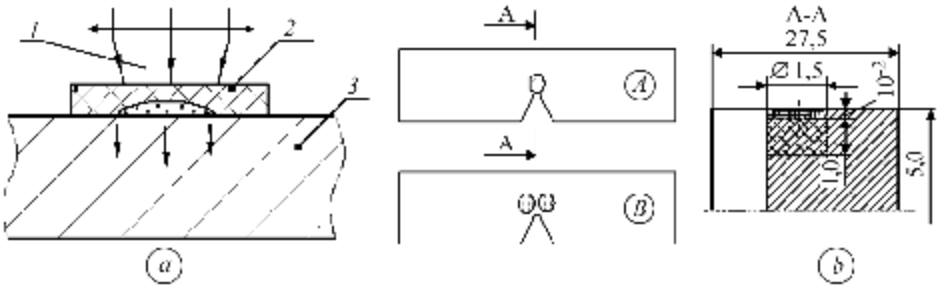
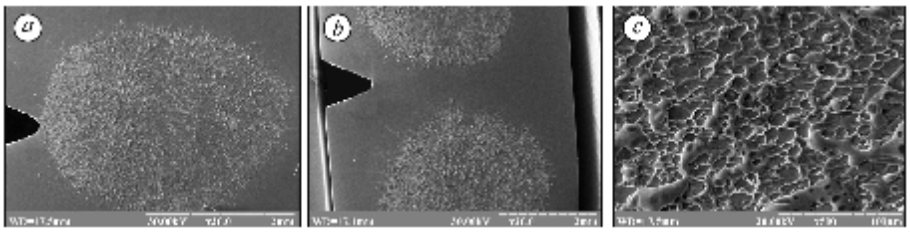


Рис. 1. Схема опромінення (*a*) та геометрія опромінених ділянок зразка (*b*):
1 – потік випромінювання; *2* – ПКС; *3* – зразок;
A – безпосередньо перед надрізом; *B* – симетрично, з двох боків надрізу.

Fig. 1. Scheme of irradiation (*a*) and geometry of the laser treated areas of specimen (*b*):
1 – radiation flux; *2* – transparent condensed medium (TCM); *3* – specimen;
A – in front of the notch; *B* – symmetric, from two sides of the notch.

Зміна енергоємності руйнування. На поверхні сталей 25Х1М1Ф і 15Х13МФ після опромінення лазерними імпульсами з енергією 15...16 J в епоксидній смолі (ПКС) за однакової відстані від центра зони опромінювання помітні повторювані з певним періодом напливи металу з порами діаметром 1...10 μm (рис. 2). Мікротвердість поверхневого шару зросла з 2100 до 6000 MPa.



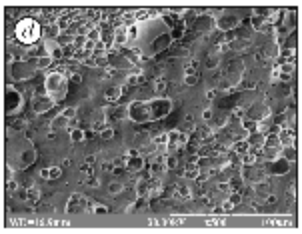


Рис. 2. Опромінена поверхня зразків: *a* – за схемою *A*; *b* – за схемою *B* (див. рис. 1); *c* – коміркова періодична структура; *d* – піноподібна пориста.

Fig. 2. Laser-treated surface of specimens: *a* – by scheme *A*; *b* – by scheme *B* (see Fig. 1); *c* – cellular periodic structure; *d* – foam structure.

Характер рельєфу поверхні (хвилеподібні періодичні структури) всіх опромінених сталей свідчить про розвиток термокапілярних процесів, високошвидкісний нагрів матеріалу в зоні опромінювання, його плавлення, швидку кристалізацію і "застигання" структури під час обробки. За розташуванням опроміненої ділянки відносно концентратора ударна в'язкість сталі змінюється. Аналіз результатів свідчить про збільшення енергоємності руйнування зразків з ферито-мартенситних сталей після лазерної обробки за схемою *A* (рис. 1). Зокрема, ударна в'язкість сталі 15Х13МФ збільшується вдвічі, а біметалевих зразків – лише на 15%. Незначне зростання енергоємності руйнування біматеріалу пов'язане, очевидно, з неоднорідністю структури сталей, в яких відбулися різні морфологічні зміни. Обробка за схемою *A* знижує ударну в'язкість сталі 25Х1М1Ф до 10%, а за схемою *B* не впливає на неї (див. рис. 1). Вплив ударно-хвильової обробки на абсолютні та відносні значення ударної вязкості ($K = KCV_0 / KCV$, де KCV_0 – ударна в'язкість зразків, опромінених попереду надрізу) ілюструє рис. 3*a*, *b*.

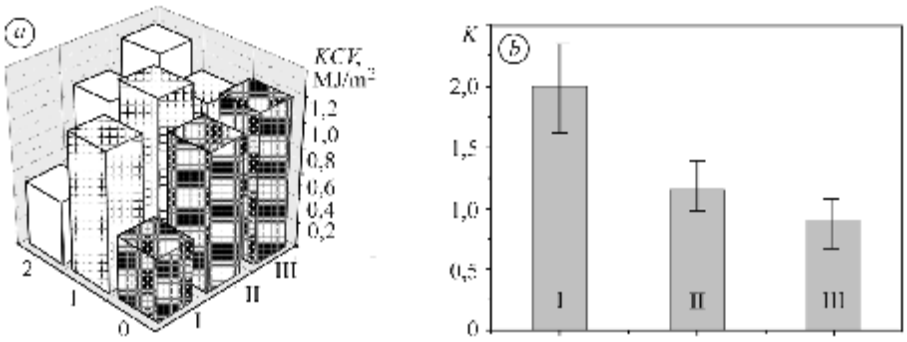


Рис. 3. Ударна в'язкість (*a*) та приведена (*b*) ударна в'язкість за різних схем опромінення:
0 – до опромінення; *1* – схема *A*; *2* – схема *B*;
I – сталь 15Х13МФ; II – сталі 18Х11МНФБ і 35Г2 (біметал); III – сталь 25Х1М1Ф.

Fig. 3. Impact toughness of steels (*a*) and the normalized (*b*) impact toughness under different schemes of irradiation: 0 – initial state; *1* – scheme *A*; *2* – scheme *B*;
I – 15Х13МФ steel; II – 18Х11МНФБ and 35Г2 steels (bimetal); III – 25Х1М1Ф steel.

Механізми руйнування оброблених зразків. Тепловий чинник лазерної обробки діє у вузькій поверхневій ділянці завглибшки до $h_i \approx 10$ μm (рис. 4*e*). На зразок також впливає ударна хвиля, спричиняючи дефектоутворення і структурні зміни на значно більшій глибині [7–9]. Зміна характеристик матеріалу після ударно-хвильового опромінення обумовлена режимами обробки, зокрема, прикладеним тиском, рівень якого визначає щільність потоку енергії лазера, теплофізичні і акустичні властивості ПКС, та опромінення. Механізм руйнування – внутрізеренний із вторинними мікротріщинами, що свідчить про збільшену енергоємність динамічного руйнування (рис. 4*a, c, e*).

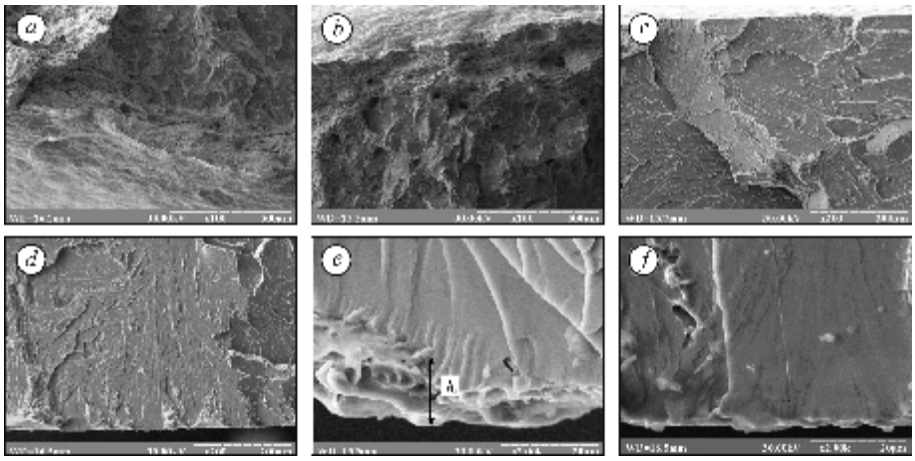


Рис. 4. Фрактограми зразків Шарпі: *a, c, e* – опромінених за схемою *A*;
b, d, f – за схемою *B* (див. рис. 1); *a, b* – сталь 25Х1М1Ф; *c–f* – сталь 15Х13МФ.

Fig. 4. Fractographs of Charpy specimens: *a, c, e* – irradiation by scheme *A*;
b, d, f – irradiation by scheme *B* (see Fig. 1); *a, b* – 25Х1М1Ф steel; *c–f* – 15Х13МФ steel.

Ударна хвиля створює напруження стиску до $0{,}25\sigma_{0,2}$ на глибину близько 1,0 mm, перерозподіляє дислокації і точкові дефекти в об'ємі матеріалу, подрібнює пакети рейкового дислокаційного мартенситу і збільшує питому довжину субмеж зерен [10]. Внаслідок цього зростає питома частка ямкового складника у зламі [11].

На поверхні руйнування сталі 25Х1М1Ф виявлено ділянки квазісколювання за кристалографічними площинами ферито-перлітних зерен (рис. 4*a, b*), які межують з ділянками ямкового в'язкого руйнування. Мікроструктура фасеток подібна до струмкового візерунку внаслідок крихкого злиття окремих мікротріщин вздовж ліній спай-

ності (рис. 4*c*, *d*). Істотне підвищення енергоємності руйнування сталі 15Х13МФ (схема *А*) обумовлене саме впливом ударної хвилі.

ВИСНОВКИ

Досліджено вплив ударно-хвильової обробки на ударну в'язкість біметалевих зразків сталей ферито-перлітного та ферито-мартенситного класів. Виявлено, що ударна в'язкість сталі 15Х13МФ, опроміненої попереду надрізу, збільшується до двох разів порівняно з вихідною. Фрактографічним аналізом зразків, випробуваних на ударну в'язкість, встановлено, що сталь 15Х13МФ та біметал 18Х11МНФБ/35Г2 руйнуються за механізмом внутрізеренного відколювання незалежно від схеми опромінювання. Зафіксовано збільшення питомої частки ямкового складника у зламі зразків, опромінених попереду надрізу, яке спричинене подрібненням пакетів рейкового дислокаційного мартенситу і збільшенням питомої довжини субмеж зерен, що підвищує енергоємність ударного руйнування цих сталей.

РЕЗЮМЕ. Исследовано влияние облучения в прозрачной конденсированной среде на ударную вязкость теплостойких сталей. Облучение образца впереди концентратора приводит к значительному (до двух раз) увеличению ударной вязкости стали 15Х13МФ. На основании фрактографического анализа выявлено, что независимо от схемы облучения эта сталь разрушалась по внутризеренному механизму. Предложен механизм увеличения ударной вязкости материала после ударно-волновой обработки.

SUMMARY. The influence of powerful laser irradiation in the transparent condensed medium on impact toughness of heat-resistance steel has been studied. Sufficient (in 2 times) increase of the impact toughness of 15Х13МФ steel, irradiated in front of the nouch has been observed. Fractographic analysis of specimens tested for the impact toughness has shown that 15Х13МФ steel specimens rupture by the transgranular fracture mechanisms, irrespective of the irradiation mechanisms. Mechanism of impact toughness increase after impact-wave treatment of specimens has been proposed.

1. *Fülöp Z., Csepeli O., and Szabados B.* Verö Thermal fatigue test of laser surface treated rollers // Materials Science Forum. – 2003. – **414–415**. – P. 207–212.
2. *Sanz A.* New coatings for continuous casting rolls // Surface and Coating Technology. – 2004. – **177–178**. – P. 1–11.
3. *Kovalyuk B. P., Nikiforov Yu. N., and Nischenko M. M.* The phase conversion in stainless steel under LSW processing // Rev. Adv. Mat. Scie. – 2004. – **8**. – P. 122–128.
4. *Rozniakowska M. and Yevtushenko A.* One approach to determination of effective absorption coefficient during laser irradiation // Materials. Tech. Tools. – 2006. – **11**, № 3. – P. 5–8.
5. *Rozniakowska M. and Yevtushenko A.* Influence of laser pulse shape both on temperature profile and hardened layer depth // Heat Mass Transfer. – 2005. – **42**, № 10. – P. 64–70.
6. *Wave-solid* interaction in laser shock induced deformation processes / Y. Fan, Y. Wang, Vukelic, and Y. L. Lao // Applied Phisics. – 2005. – **98**. – P. 104–109.
7. *Иванов Л. И., Никифоров Ю. Н., Янушкевич В. А.* Эффект изменения электропроводности полупроводниковых кристаллов при прохождении ударной волны от импульса излучения ОКГ // Журн. эксп. и теорет. физики. – 1974. – **67**, № 1(2). – С. 147–150.
8. *Изменение* ударной вязкости разрушения сталей после обработки мощными импульсами лазера / Б. П. Ковалюк, Ю. Н. Никифоров, В. Б. Гладьо, П. О. Марущак // Тез. докл. III Междунар. науч.-техн. конф. "Современные методы и технологии создания и обработки материалов". – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2008. – **2**. – С. 280–285.
9. *Вплив* лазерної обробки в прозорому конденсованому середовищі на ударну в'язкість теплостійких сталей / В. Б. Гладьо, П. О. Марущак, Ю. М. Нікіфоров, Б. П. Ковалюк // Тези доп. Міжнар. наук. конф. "Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур". – Харків: НФТЦ МОН та НАН України, 2008. – С. 395–398.
10. *Wang F., Yao Z., and Deng Q.* Experimental study on laser shock processing of brass // J. University of Science and Technology Beijing. – 2007. – **14**, № 6. – P. 529–532.
11. *Clauer A. H., Holbrook J. H., and Fairand B. P.* Effects of laser induced shock waves on metals // Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals. – NY: Plenum publishing corporation, 1981. – P. 675–701.

Одержано 22.01.2009