

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 691.87:691.714:539.434

© Вакуленко І.А.<sup>1</sup>, Лисняк А.Г.<sup>2</sup>, Перков О.Н.<sup>3</sup>, Ефременко В.Г.<sup>4</sup>

### ВЛИЯНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ЖИДКОСТИ НА ОГРАНИЧЕННУЮ ВЫНОСЛИВОСТЬ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

*В статье показано, что обработка углеродистой стали импульсами ударной волны сопровождается приростом твердости и выносливости. Наблюдаемый прирост выносливости стали обусловлен смещением момента перехода металла от обратимой к необратимой повреждаемости в область более высоких амплитуд с одновременным увеличением числа циклов до разрушения.*

**Ключевые слова:** твердость, цикл нагружения, выносливость, повреждаемость, амплитуда, углеродистая сталь.

*Вакуленко І.О., Лисняк О.Г., Перков О.М., Ефременко В.Г. Вплив ударної хвилі в рідині на обмежену витривалість вуглецевої сталі. У статті показано, що обробка вуглецевої сталі імпульсами ударної хвилі супроводжується приростом твердості і витривалості. Приріст витривалості сталі обумовлений зсувом моменту переходу металу від зворотньої до необерненої пошкоджуваності в область більши високих амплітуд з одночасним збільшенням числа циклів до руйнування.*

**Ключові слова:** твердість, цикл навантаження, витривалість, пошкоджуваність, амплітуда, вуглецева сталь.

*I.O. Vakulenko, O.G. Lisnyak, O.M. Perkov, V.G. Efremenko. Influence of shock wave in a liquid on the limited endurance of carbon steel. The effect of shock wave treatment in water on fatigue behavior of heat treated carbon steel is presented in the article. The carbon steel with 0.45 % of carbon was studied. Before being treated with shock wave the specimens were quenched and tempered at 300°C. Cyclic loading on symmetrical bending trials was performed. It was found that the shock wave treatment results in hardness and fatigue strength of steel increase. The hardness increase derives from the growth of the total number of the crystal lattice defects. The increase of fatigue endurance is attributed to the moment of transition shift from reversible to irreversible damage up to the higher amplitude area accompanied by growth of cycles number before breakage. It is due to the improvement of steel structure resulting from the shock wave processing. It ensues from the mobile dislocations increased amount, which provides, through recombination, the subsequent increase of endurance in cyclic loading. As an additional source of the amount of mobile dislocations increase is the dislocations tear-out from fastening spots as a result of the shock wave treatment.*

**Keywords:** hardness, cycle of loading, endurance, damage, amplitude, carbon steel.

**Постановка проблемы и анализ известных публикаций.** В процессе циклического нагружения изменение плотности дефектов кристаллического строения, их перераспределение определяют запас выносливости металла [1]. На основании этого внешние воздействия, напри-

<sup>1</sup> д-р техн. наук, профессор, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. Академика В. Лазаряна, г. Днепропетровск

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, Днепропетровский национальный горный университет, г. Днепропетровск

<sup>3</sup> канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, г. Днепропетровск

<sup>4</sup> д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

мер, механического характера, способны оказывать влияние на развитие процессов структурных изменений при циклическом нагружении.

Достаточно широкое распространение получила технология обработки с использованием ударной волны [2]. Указанная технология по характеру своего влияния на структуру и свойства обрабатываемого металлического материала относится к механическому воздействию. Использование ударной волны для упрочнения металла позволяет достигнуть эффекта, который существенно превышает влияние от пластической деформации [3, 4]. Представляет определенный научный и практический интерес оценка влияния обработки с использованием ударной волны на поведение углеродистой стали в условиях ограниченной выносливости циклического нагружения.

**Цель работы.** Оценка влияния импульсов ударной волны на ограниченную выносливость термоупрочненной стали в условиях знакопеременного изгиба.

**Материал и методики исследований.** В качестве материала для исследования использовали углеродистую сталь с 0,45 % углерода, концентрация других химических элементов находилась в пределах марки стали 45. Образцы для испытаний изготавливали в виде пластин толщиной 1, шириной 15 и длиной 120-180 мм. Структурное состояние металла соответствовало улучшению (закалка на мартенсит, с последующим отпуском при 300 °С, в течение 1 ч). Микроструктура исследовалась с использованием световой и электронной микроскопии [5]. Твердость измеряли по методу Роквелла (шкала «С»). Циклическое нагружение осуществляли в условиях симметричного изгиба на испытательной машине «Сатурн-10» при температуре +20 °С. Оценивали ограниченную повреждаемость, анализируя построенные линии Френча. Нагружение ударной волной (УВ) осуществлялось в воде от электрического разряда с использованием установки типа «Искра-23». Амплитуда электрического импульса составляла 1-2 ГПа при напряжении 15-18 кВ. Обработка металла заключалась в наборе до 15 тыс. импульсов.

**Изложение основного материала.** Действие ударной волны в жидкости от электрического разряда для большинства металлических материалов подобно упрочнению [2]. Анализ известных экспериментальных результатов указывает на достаточно сложное влияние на комплекс свойств указанной обработки [3]. Достаточно часто увеличение количества дефектов кристаллического строения и, в первую очередь дислокаций, приводит к неоднозначному влиянию на механические характеристики металлов и сплавов. Приведенное положение может быть связано с различными условиями обработки ударной волной. Действительно, как показано в [4], прирост амплитуды возникающей волны в первую очередь определяет прирост плотности дислокаций. Совершенно иное влияние оказывает длительность импульса. При постоянной амплитуде импульса его длительность в большей мере определяет условия перемещения дислокаций.

Анализ микроструктуры показал, что сформированная структура в действительности соответствует закалке на мартенсит с последующим отпуском при 300 °С. Обнаруженные признаки начальных этапов выделения мелкодисперсных карбидных частиц на дислокациях в середине и на границах мартенситных реек, декорирование дислокационных скоплений можно рассматривать как свидетельство практически полного отсутствия подвижных дислокаций. Таким образом, большинство дислокаций в стали после улучшения неспособны либо с большими трудностями могут принимать участие в структурных изменениях при циклическом нагружении. Приведенные положения подтверждают данные измерения твердости металла. В состоянии после закалки и отпуска сталь 45 обладала твердостью 46,6 HRC, а после обработки УВ был обнаружен прирост твердости до 51,8 HRC. Полученный эффект не противоречит известным результатам [3, 4].

Методически влияние ударного нагружения на характер поведения металла в условиях ограниченной выносливости осуществляли следующим образом. Сначала, из анализа кривой циклического нагружения исследуемой стали после улучшения (кривая 1, рис. 1) определяли величину ограниченной выносливости (число циклов до разрушения при определенной величине амплитуды нагружения) [1]. После этого, другие образцы циклически нагружали до уровня примерно 0,6 от величины ограниченной выносливости и подвергали УВ обработке. Далее, их подвергали циклическому нагружению при соответствующих амплитудах ( $\sigma_a$ ), до окончательного разрушения. Величину ограниченной выносливости оценивали как сумму числа циклов до обработки УВ и после, до момента разрушения. По полученным результатам строилась кривая 2 (рис. 1). Сравнительный анализ поведения металла до и после УВ обработки указыва-

ет на существование качественных различий. Более того, полученные результаты указывают на возможные изменения во внутреннем строении металла в результате УВ. Например, для области малоциклового усталости возрастание амплитуды нагружения сопровождается снижением различий в значениях ограниченной выносливости, которая при амплитуде 1000 МПа практически отсутствует. Дальнейшая экстраполяция кривых циклического нагружения в область более высоких амплитуд свидетельствует о негативном влиянии УВ на уровень ограниченной выносливости (рис. 1). С другой стороны, при уменьшении  $\sigma_a$  наблюдается возрастание числа циклов до разрушения, независимо от предыдущей обработки. Более пологий ход усталостной кривой металла после УВ указывает на достаточно эффективное положительное влияние на ограниченную выносливость. Примером может служить часть переходного участка от малоциклового к высокоциклового усталости. Для амплитуды 560 МПа обработка ударной волной привела к возрастанию числа циклов до разрушения примерно на 30 % (рис. 1). Значения предела усталости ( $\sigma_{-1}$ ) для кривых 1 и 2 соответственно составили 460 и 525 МПа.

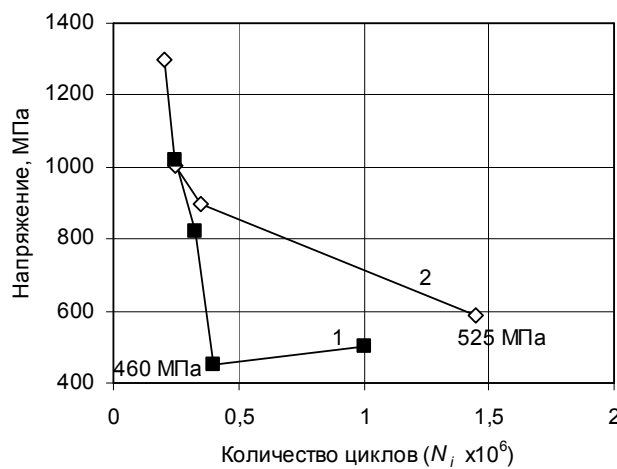


Рис. 1 – Фрагменты диаграмм циклического нагружения стали после улучшения (1) и после промежуточной УВ обработки (2)

С целью объяснения механизма воздействия на металл ударной волны, кроме кривых усталости, осуществляли построение кривых повреждаемости [6, 7], называемых в литературе линиями Френча [6]. На рис. 2 представлена кривая усталости ABCDE стали после улучшения. Кривую FNG называют линией обратимой повреждаемости, которая характеризует условия образования субмикротрещин. Построение линии Френча осуществляется за счет использования двух расчетных напряжений ( $\alpha$  и  $\beta$ ), которые для большинства углеродистых сталей, независимо от их структурного состояния, дисперсности, морфологии карбидной составляющей являются постоянными и одной экспериментально определяемой величины  $\sigma_{-1}$ . Первое напряжение ( $\sigma_{\gamma}$ ) является напряжением ограниченной выносливости при соответствующем числе циклов ( $0,37 \cdot 10^6$ ), представляет собой превышение на величину  $\alpha$  значения  $\sigma_{-1}$ . В этом случае достигаются условия формирования дефектов, которые приводят к необратимой повреждаемости целостности металла. Величина  $\sigma_{\gamma}$  оценивается по соотношению:

$$\sigma_{\gamma} = \alpha - \sigma_{-1} \quad (1)$$

Учитывая, что  $\alpha$  является постоянной для подавляющего числа углеродистых сталей [6] и составляет 85 МПа, по соотношению (1) определили значение  $\sigma_{\gamma}$ , которое составило 545 МПа (положение т. С на кривой ABCDE, рис. 2).

Другое напряжение ( $\beta$ ) позволяет определить условия достижения критического значения искажений кристаллической решетки второго рода в микрообъемах металла. Считается [6], что при амплитуде цикла равной  $\sigma_{\beta}$  начинают формироваться субмикротрещины. Величина  $\sigma_{\beta}$  определяется по соотношению:

$$\sigma_{\beta} = \sigma_{-1} - \beta \quad (2)$$

Подставляя в (2)  $\beta=65$  МПа, определили, что  $\sigma_{\beta}$  составляет 395 МПа (т.Н на кривой FNG,

рис. 2). Зная положение т. Н, проводим параллельную линию соответствующему участку кривой малоциклового усталости (FH). Для определения координат т. F осуществляется следующее построение. Отрезок между кривыми ABCD и FH (по оси абсцисс), для ординаты 545 МПа разделяют на две равные части. Через эту точку проводится прямая, соединяющая т. D и точку пересечения с линией FH. Линия FD является линией Френча. Указанная прямая представляет собой границу, разделяющую области с качественно различным характером формирования повреждений металла при циклическом нагружении. Так, при значениях амплитуд на диаграмме циклического нагружения (рис. 2) слева от линии FH условия нагружения металла соответствуют инкубационному периоду формирования повреждений металла. Площадь, ограниченная линиями FH и FD, представляет собой массив значений амплитуд, при которых начинается (на уровне микрообъемов) разрыхление металла. Пространство между линиями FD и ABC представляет область роста микротрещин до критического размера.

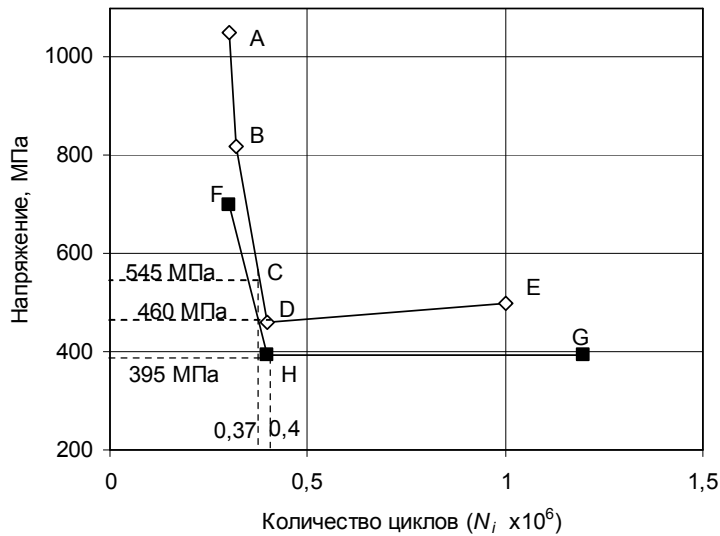


Рис. 2 – Кривая усталости стали после улучшения (ABCDE – кривая ограниченной усталости, FHG – кривая для определения линии Френча)

Результаты построения кривой циклического нагружения и соответствующей кривой для определения положения линии Френча исследуемой стали после УВ обработки представлены на рис. 3. После расчета значений амплитуд  $\sigma_\gamma$  и  $\sigma_\sigma$ , линия Френча соединяет точки F и D (рис. 3).

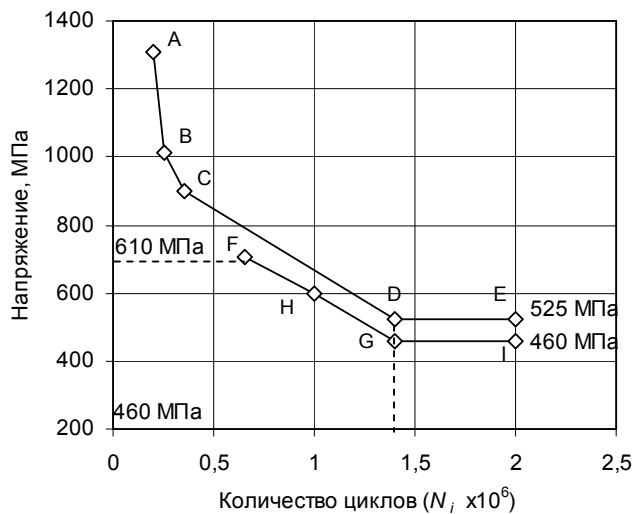


Рис. 3 – Кривая усталости стали после УВ обработки: ABCDE – кривая ограниченной усталости; FHGI – кривая для определения линии Френча

Из сравнительного анализа (рис. 2 и 3) следует, что обработка импульсами ударной волны приводит к смещению момента перехода металла от обратимой к необратимой повреждаемости в область повышенных амплитуд с одновременным возрастанием числа циклов до разрушения. Увеличение выносливости металла неизбежно связано с введением дополнительного количества дислокаций от импульсов ударной волны. Из них значительная часть должна обладать определенной подвижностью, что в свою очередь обеспечит качественные изменения в дислокационной структуре при циклическом нагружении. На основании этого, при одинаковой амплитуде нагружения, единичный цикл деформации должен осуществляться при участии большего числа дислокаций. Таким образом, в результате УВ обработки стали со структурой улучшения по видимому происходит возрастание количества подвижных дислокаций, которые обеспечивают, за счет рекомбинации, прирост выносливости при последующем циклическом нагружении. В качестве дополнительного источника прироста количества подвижных дислокаций не исключается отрыв дислокаций от мест закрепления в результате действия ударной волны.

#### Выводы

1. Наблюдаемое возрастание твердости после действия ударной волны свидетельствует о приросте общего количества дефектов кристаллического строения.

2. Установлено, что обработка импульсами ударной волны приводит к смещению момента перехода металла от обратимой к необратимой повреждаемости в область повышенных амплитуд с одновременным увеличением числа циклов до разрушения.

#### Список использованных источников:

1. Вакуленко І.О. Втома металевих матеріалів в конструкціях рухомого складу / І.О. Вакуленко. – Дніпропетровськ : Маковецький, 2012. – 152 с.
2. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / Под ред. М.А. Мейерса, Л.Е. Мурра. – М. : Металлургия, 1984. – 510 с.
3. Razavian S.M. Numerical simulation of high voltage electric pulse comminution of phosphate ore / S.M. Razavian, B. Rezai, M. Irannajad // International Journal of Mining Science and Technology. – 2015. – V. 25. – P. 473-478.
4. Чачин В.Н. Электрогидравлическая обработка машиностроительных материалов / В.Н. Чачин. – Минск : Наука и техника, 1978. – 184 с.
5. Вакуленко І.О. Структурний аналіз в матеріалознавстві / І.О. Вакуленко. – Дніпропетровськ: Маковецький, 2010, – 124 с.
6. Иванова В.С. Ускоренный метод построения линии Френча с применением энергетических критериев усталости / В.С. Иванова, Т.С. Марьяновская, В.Ф. Терентьев // Заводская лаборатория. – 1966. – № 2. – С. 225-228.
7. Геминев В.Н. Обобщенная функция накопления повреждений при усталости / В.Н. Геминев, В.С. Балыбердин // Усталость и вязкость разрушения металлов. – М. : Наука, 1974. – С. 171-180.

#### Bibliography:

1. Vakulenko I.A. Fatigue of metallic materials in the construction of the rolling stock / I.A. Vakulenko. – Dnepropetrovsk : Makovetskiy, 2012. – 152 p. (Ukr.)
2. Shock waves and the phenomenon of high-speed deformation of metals / Edition of M.A. Meiers, L.E. Murr. – M. : Metallurgiya, 1984. – 510 p. (Rus.)
3. Razavian S.M. Numerical simulation of high voltage electric pulse comminution of phosphate ore / S.M. Razavian, B. Rezai, M. Irannajad // International Journal of Mining Science and Technology. – 2015. – V. 25. – P. 473-478.
4. Chachin V.N. Electro-hydraulic processing of engineering materials / V.N. Chachin. – Minsk : Nauka i tekhnika, 1978. – 184 p. (Rus.)
5. Vakulenko I.A. Structural analysis in material science / I.A. Vakulenko. – Dnepropetrovsk : Makovetskiy, 2010. – 124 p. (Ukr.)
6. Ivanova V.S. Rapid method for constructing a French line using energy criteria of fatigue / V.S. Ivanova, T.S. Marianovskaia, V.F. Terentieva // Zavodskaya laboratoriya. – 1966. – № 2. – P. 225-228. (Rus.)

7. Geminov V.N. Generalized function for fatigue damage accumulation / V.N. Geminov, V.S. Balyberdin // Fatigue and fracture toughness of metals. – М. : Nauka, 1974. – P. 171-180. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 15.04.2015

УДК 669.112.227.1

© Хлестов В.М.<sup>1</sup>, Якушечкина Л.И.<sup>2</sup>, Щеглова А.М.<sup>3</sup>

### ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАГРЕВА НА ТОЧКУ $A_{C3}$ И НА РАЗМЕР ЗЕРНА АУСТЕНИТА

*Исследования выполнены на универсальной установке скоростного непосредственного электронагрева с одновременной регистрацией дилатометрической и термической кривых нагрева стали Ст6. Изучали влияние скорости нагрева от 0,1 до 30°C/c на положение точки  $A_{C3}$ , размер начального зерна аустенита и рост аустенитного зерна при нагреве до 1000°C. Точку  $A_{C3}$  определяли на дилатометрической и термической кривых и уточняли металлографически на оптическом и электронном микроскопах. Точка  $A_{C3}$  повышается при увеличении скорости нагрева от 0,1 до 10°C/c примерно на 40°C, а размер начального аустенитного зерна, наоборот, значительно уменьшается. Наиболее интенсивно аустенитное зерно растёт при медленном повышении температуры нагрева до 1000°C.*

**Ключевые слова:** начальное зерно аустенита, скорость непосредственного электронагрева, изотермический рост зерна аустенита, изотермическая выдержка.

*Хлестов В.М., Якушечкина Л.И., Щеглова Г.М. Вплив швидкості нагріву на точку  $A_{C3}$  і на розмір зерна аустеніту. Дослідження виконані на універсальній установці швидкісного безпосереднього електронагріву з одночасною реєстрацією дилатометричної і термічної кривих нагрівання сталі Ст6. Досліджували вплив швидкості нагріву від 0,1 до 30°C/c на положення точки  $A_{C3}$ , розмір початкового зерна аустеніту і зростання аустенітного зерна при нагріванні до 1000°C. Точку  $A_{C3}$  визначали на перегінах дилатометричної і термічної кривих і уточнювали металографічним методом на оптичному та електронному мікроскопах. Точка  $A_{C3}$  підвищується при збільшенні швидкості нагріву від 0,1 до 10°C/c приблизно на 40°C, а розмір початкового аустенітного зерна, навпаки, значно зменшується. Найбільш інтенсивно аустенітне зерно росте при повільному підвищенні температури нагріву до 1000°C.*

**Ключові слова:** початкове зерно аустеніту, швидкість безпосереднього електронагрівання, ізотермічний зростання зерна аустеніту, ізотермічна витримка.

*V.M. Khlestov, L.I. Yakushechkina, G.M. Shcheglova. The influence of the heating rate on the point  $A_{C3}$  and on austenite grain growth. In the work the influence of the heating rate, temperature and soaking time in  $\gamma$ -area upon austenite grain growth in Ct6 steel of standard composition was investigated in this work. The experiments were carried out at the installation for complex investigations of alloys over a wide range of electric heating rate for the specimens of 10mm in diameter and 50mm long. Changes in the specimens' temperature and length were registered. The critical point  $A_{C3}$  was deter-*

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>3</sup> инженер, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь,  
[anna\\_shseglova.pstu@gmail.com](mailto:anna_shseglova.pstu@gmail.com)