

© В.А. Козечко¹, В.І. Козечко¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ЗМІНИ МІКРОСТРУКТУРИ І МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

© V. Kozechko¹, V. Kozechko¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

CHARACTERISTICS OF CHANGES IN MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL CHARACTERISTICS UNDER HIGH ENERGY LOAD

Мета. Перевірка гіпотези про можливість отримання дрібнозернистої структури металу в результаті обробки енергіями високої щільності.

Методика. Дослідження проводились на циліндричних зразках діаметром 50 мм та довжиною 300 мм, що були виготовлені з конструкційної сталі 45 в нормалізованому стані. Товщина внутрішнього коаксіального з металом шару ВР1 із швидкістю детонації $D = 7,5$ км/с, складала 3 мм, товщини зовнішнього шару ВР2 із швидкістю детонації $D = 3,5$ км/с складала 40 мм. Використаний в експерименті двошаровий заряд ВР збільшує тривалість дії ударної хвилі і в той же час оберігає зразки від руйнування.

Результати. Механізм наноструктуризації, у загальних рисах, полягає в накопиченні ступеня деформації без руйнування, що приводить до дефрагментації структури при значному збільшенні щільності дислокацій.

Одним з методів, що дозволяють досягти високої щільності дислокацій, сумірної з інтенсивною пластичною деформацією, є обробка за допомогою високоенергетичної обробки (ударними хвилями).

Зміна зеренної структури в місцях пор свідчить про надвисокі ступені неоднорідної деформації в цих областях. При проходженні ударної хвилі в середині зразка, на межах розділу фаз з різною щільністю, виникають дифракційні хвильові ефекти, що приводять до виникнення зсувних деформацій. Можна припустити, що в районі пор і мікротріщин умови деформації аналогічні тим, які реалізуються при деяких методах інтенсивної пластичної деформації. Це приводить до різкого подрібнення зеренної структури і відповідної зміни механічних властивостей.

Наукова новизна. В роботі встановлено, що обробка сталевих деталей за допомогою енергії високої щільності призводить до різкого подрібнення зерна до наноструктурного розміру і, як наслідок, до підвищення механічних властивостей. Виявлені закономірності дозволяють отримати оптимальні параметри високоенергетичної обробки, що призводять до підвищення твердості, перерозподілу внутрішніх напружень та зниження шорсткості поверхні.

Практична значимість. Отримання в структурі матеріалу зерна з наноструктурними характеристиками дозволить створити принципово нові прилади та матеріали. Такі матеріали матимуть властивості, що значно перевершують досягнутий їх рівень – що важливо для багатьох галузей техніки, медицини, біотехнології, охорони навколишнього середовища, оборони тощо.

Ключові слова: наноструктура, мікротвердість енергія високої щільності, ударно-хвильове навантаження.

Вступ. На ефекти, що відбуваються в металі при дії на нього енергії високої щільності, значно впливають параметри методу, що використовується [1–6]. При ударно-хвильовому (вибуховому) навантаженні параметри залежать від схеми навантаження. У практиці використовують, як правило, дві схеми навантаження рисунок 1:

I – ударними хвилями від вибуху контактних зарядів ВР;

II – ударними хвилями, викликаними високошвидкісним зіткненням пластини.

Схема метання пластин дає можливість отримання ефекту сильного зміцнення, але не технологічна і використовується, в основному, для дослідницьких цілей.

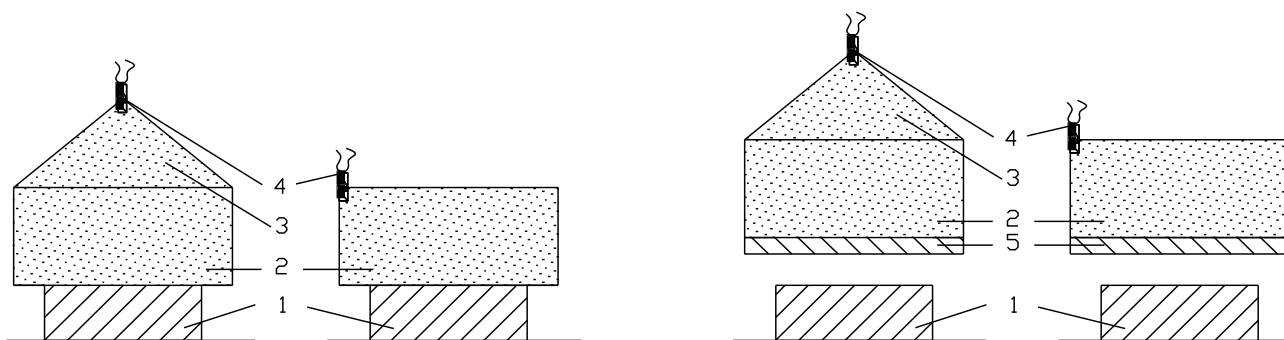


Рис. 1. Схеми вибухового зміцнення: I – ударними хвилями від вибуху контактного заряду ВВ; II – ударними хвилями при метанні пластини; а – зміцнення плоскою ударною хвилею; б – зміцнення косою ударною хвилею. 1 – зміцнюваного зразка; 2 – заряд ВР; 3 – генератор плоскої ударної хвилі, 4 – капсуль-детонатор

У технології зміцнення найчастіше застосовують схему контактного вибуху, коли заряд ВВ розташований в безпосередньому контакті із зміцнюваною поверхнею металу. В цьому випадку, завдяки високому тиску, що значно перевершує межу текучості, легко досягається висока ефективність обробки.

Залежно від способу ініціювання заряду розрізняють зміцнення плоскою ударною хвилею, коли детонаційна хвиля рухається нормально до зміцнюваної поверхні, і косою ударною хвилею, коли детонаційна хвиля рухається під кутом до поверхні, що зміцнюється.

Порівняння змін структури і механічних властивостей металу при зміцненні його плоскою і косою ударними хвилями показало, що:

1. У обох випадках визначальну роль в збільшенні мікротвердості грає тиск на фронті ударної хвилі;

2. При одному і тому ж тиску на фронті глибина зміцненої зони істотно більше при зміцненні косою ударною хвилею.

Зважаючи на простоту здійснення і можливість обробляти поверхні складної конфігурації, слід рахувати схему контактного навантаження косою ударною хвилею найбільш технологічною.

У зв'язку з тим, що всі структурні зміни в металі, приводять до зміни механічних властивостей, вимагають певного часу, питання тривалості дії тиску при вибуховому зміцненні і вплив цього часу на властивості металу ви-ходить на передній план.

Показано, що час дії тиску залежить від товщини заряду, впливає на величину зміцнення і ширину зміцненої зони, грає певну роль в процесі згасання ударної хвилі при русі її по металу, а також є критичним чинником при зміцненні в результаті фазових перетворень.

Основна частина. При вибуховому навантаженні деформація починається ковзанням, принаймні, відразу по двох системах, навіть при найменших ступенях деформації. При цьому смуги ковзання коротші, ніж при статичній деформації, і середня довжина їх зменшується із збільшенням ступеня деформації. Це обумовлено тим, що середня довжина вільного пробігу дислокації при вибуховому навантаженні невелика (в 2–3 рази менше, ніж при статичній), оскільки збільшується число бар'єрів, перешкоджаючих руху дислокацій, і вони розташовуються на меншій відстані один від одного, що пов'язано з дією вторинних систем ковзання. Щільність смуг ковзання і висота сходинки із збільшенням ступеня деформації зростають.

Таким чином, при вибуховому навантаженні відразу ж розвивається множинне ковзання.

Оскільки, в результаті взаємодії дислокацій первинної і вторинної систем виникають перешкоди, у яких можливо загальмовування дислокацій, то відбувається зміцнення металів.

Двійники при статичній деформації, як правило, розвиваються від границь зерен, мають лінзообразну форму в площині шліфа і в межах одного зерна розташовуються по одному – двох напрямках. Межі зерен в цьому випадку служать концентраторами напруг.

При вибуховому навантаженні роль двійникування значно зростає, воно йде по великому числу площин і щільність двійників збільшується майже в три рази. Двійники з'являються так само в тілі зерна, тобто виникнення їх у меншій мірі залежить від концентрації напруг на межі зерна.

Таким чином, при вибуховому навантаженні зростає роль внутре-зеренної деформації.

Найбільш важливим чинником, що визначає структуру деформованого металу відносяться також щільність і розподіл дислокацій, концентрація точкових дефектів, розмір осередків, дислокацій, і інші елементи субструктури.

Відмітними особливостями деформації при ударному навантаженні є мала величина залишкової пластичної деформації (при високому рівні діючих напруг) і великі швидкості деформації (звичайно порядку $10^6 - 10^9$ с⁻¹).

Порівняння механічних властивостей металу, деформованого статично і ударною хвилею, показує, що при одних і тих же ступенях залишкової деформації міцносні властивості вище для металів, деформованих ударною хвилею.

На рисунку 2 приведений графік зміни міцносних характеристик сталі залежно від схеми деформації за даними роботи.

Таким чином, величина залишкової деформації не є головним чинником в досягненні максимального зміцнення металу при зміцненні вибухом. У зв'язку з цим, питання про вплив швидкості деформації на зміцнення металу є першорядним.

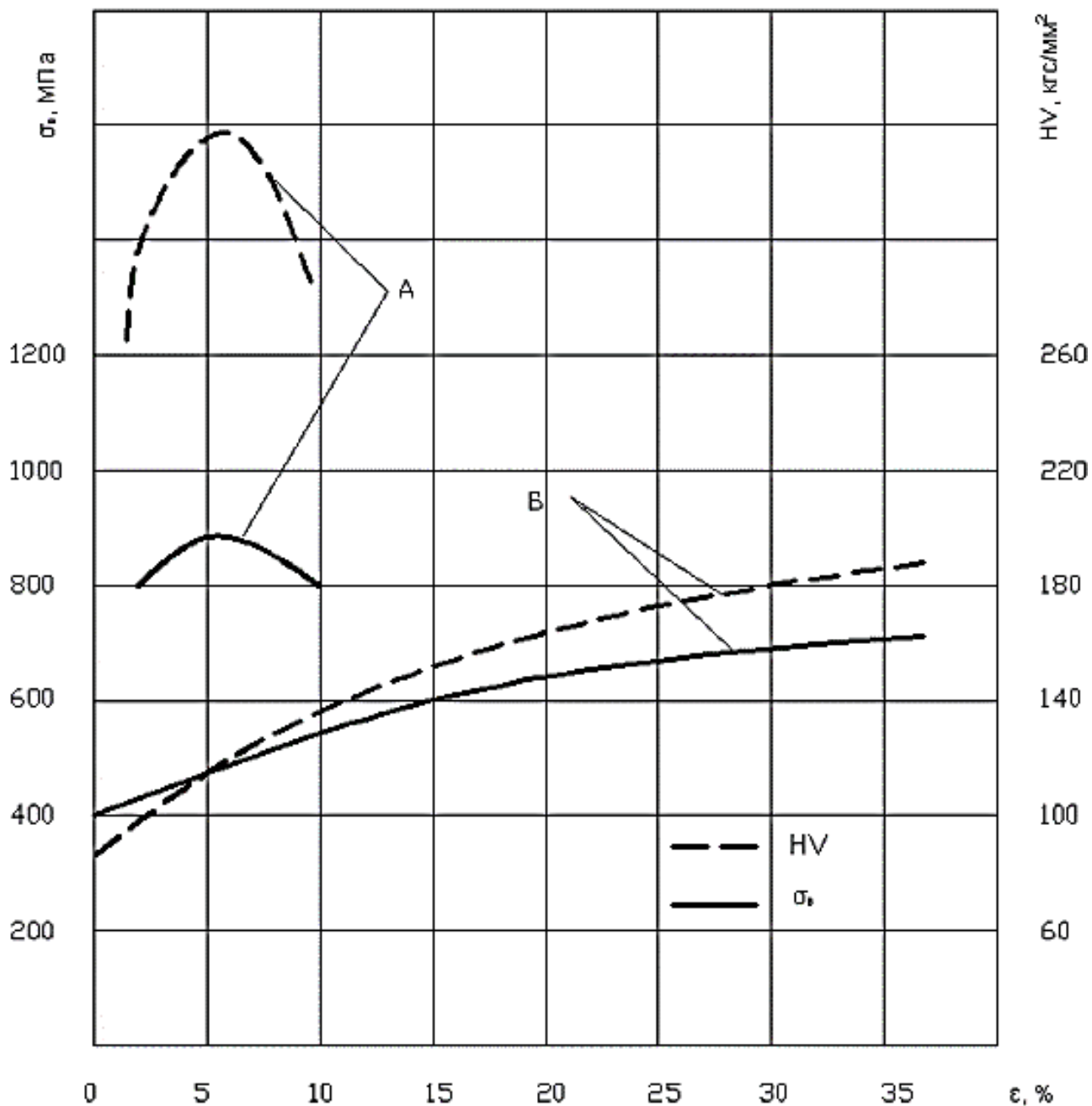


Рис. 2. Графік зміни характеристик міцності сталі в залежності від схеми навантаження: А – зміцнення вибухом; Б – статична деформація

Зі зростанням тиску на фронті ударної хвилі концентрація дефектів всіх типів збільшується. Проте як показав Грейс, існує тиск, при якому настає граничне насичення металу дефектами різного типу. У таблиці приведені дані про концентрацію точкових і лінійних дефектів в залізі, деформованому вибухом з різним тиском на фронті ударної хвилі.

Таким чином, загальна висока концентрація дефектів, також як і множинне ковзання, є однією з характерних особливостей високошвидкісної деформації.

Таблиця

Концентрація дефектів в залізі, деформованому енергією високої щільності

Тиск P, ГПа	Концентрація межвузлевих атомів $C_i \cdot 10^5$	Концентрація вакансій $C_v \cdot 10^5$	Щільність дислокацій $\rho \cdot 10^{10}, \text{см}^{-2}$
9	0,78	2,91	1,54
15	0,85	3,13	2,40
30	0,97	3,30	2,78
50	1,15	3,78	2,88

Зміна структурних і механічних властивостей при вибуховому навантаженні залежать не тільки від швидкості навантаження, але і від будови кристалічної решітки металу, що деформується. Так в металах з ОЦК ґратами, підданих вибуховій деформації, як правило, відбувається двійникування, що знижує пластичні властивості металу. У металах з ГПУ ґратами при вибуховому навантаженні з тиском до 20 ГПа деформація розвивається ковзанням по багатьох площинах і двійникуваннях, при тиску до 40 ГПа – основним механізмом деформації стає двійникування.

Відомим методом отримання наноструктурних розмірів зерен металу є метод інтенсивної пластичної деформації (ПД), наприклад кручення в умовах гідростатичного стиснення або метод рівноканального кутового пресування.

Механізм наноструктуризації, у загальних рисах, полягає в накопиченні ступеня деформації без руйнування, що приводить до дефрагментації структури при значному збільшенні щільності дислокацій.

Одним з методів, що дозволяють досягти високої щільності дислокацій, сумірної з ПД, є обробка ударними хвилями.

Дослідження були проведені на циліндрових зразка діаметром 50 мм і завдовжки 300 мм із сталі 45 в нормалізованому стані. Навантаження проводилося двошаровим зарядом ВВ. Товщина внутрішнього коаксіального з металом шару ВР1 із швидкістю детонації $D = 7,5$ км/с, складала 3 мм, товщини зовнішнього шару ВР2 із швидкістю детонації $D = 3,5$ км/с складала 40 мм. Використаний в експерименті двошаровий заряд ВР збільшує тривалість дії ударної хвилі і в той же час оберігає зразки від руйнування. Схема навантаження приведена на рисунку 3.

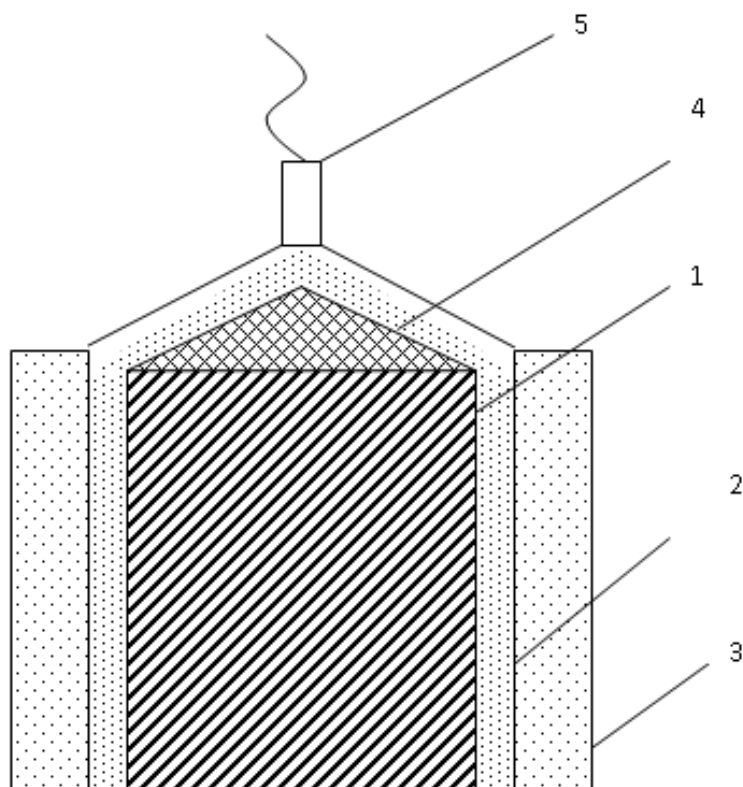


Рис. 3. Схема високоенергетичної обробки: 1 – зразок, 2 – шар ВР1, 3 – шар ВР2, 4 – допоміжний конус, 5 – капсуль детонатор

Аналіз мікроструктурних особливостей зразків, підданих ударно-хвильовому навантаженню показав, що спостерігається різка зміна зеренної структури в області розташування пір і мікротріщин (рис. 4 а, б, в). Після ударно-хвильової обробки відбувається заварювання цих дефектів, і на їх місці виникають області матеріалу з різким подрібненням мікроструктури і з аномально високою твердістю.

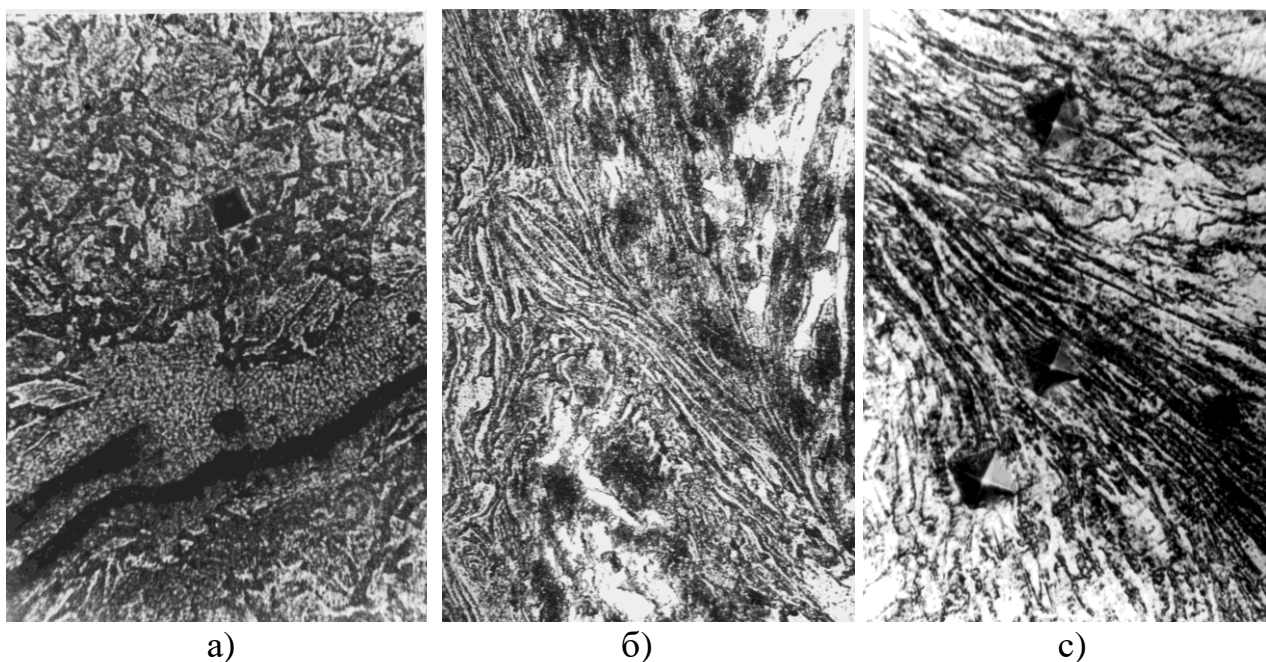


Рис. 4. Мікроструктура зразків після випробувань в зонах пор і мікротріщин

Твердість образу до обробки складала в середньому $HV = 200$ кгс/мм², після обробки ударними хвилями в середньому $HV = 400$ кгс/мм², а в районі подрібнення структури $HV = 1100$ кгс/мм².

Формозмінення зеренної структури в районі пір свідчить про надвисокі ступені неоднорідної деформації в цих областях. При проходженні ударної хвилі за зразком, на межах розділу фаз з різною щільністю, виникають дифракційні хвильові ефекти, що приводять до виникнення зсувних деформацій. Можна припустити, що в районі пір і мікротріщин умови деформації аналогічні тим, які реалізуються при деяких методах ПД. Це приводить до різкого подрібнення зеренної структури і відповідної зміни механічних властивостей.

Для отримання наддрібнозеренних структур у центрі деформації необхідний високий гідростатичний тиск, який дозволяє досягти високих ступенів деформації без руйнування. На фронті ударної хвилі тиск досягає сотні кілобар. При використанні двошарового заряду ВР, відбувається збільшення тривалості дії ударної хвилі стиснення і затримка приходу хвилі розтягування. За рахунок цього утворюється велика кількість дефектів кристалічної структури без руйнування зразка. Зокрема, щільність дислокацій досягає 10^{12} см⁻², причому спостерігається надлишок дислокацій одного знаку. Таким чином, створюються передумови для подрібнення структури. Проте тільки при різкій зміні руху фронту ударної хвилі можуть створитися умови для фрагментації утворення великокутових меж. У районі меж розділу фаз, в результаті стрибка щільності, виникає зміна напрямку руху ударної хвилі, що приводить до «вихрового» характеру макродеформації. При цьому виникає мікрофрагментація, аналогічна тій, яка відбувається при ПД.

Подібні структури можна побачити при аналізі зони з'єднання, утвореної зварюванням вибухом. У «завихреннях» зварних швів при певних параметрах процесу утворюється як ділянки перекристалізованого, так і ділянки сильно деформованого металу. У обох випадках в цих місцях властивості матеріалу значно відрізняються від основного металу у бік зміцнення, і наголошується різке подрібнення мікроструктури. Ділянки дрібнозернистого металу, утворилися в результаті дії ударної хвилі володіють підвищеною термічною стабільністю.

Висновки. Таким чином, ударно хвильова обробка металу в певних умовах, може розглядатися як процес обробки що дозволяє одержати матеріал з наноструктурними характеристиками.

Показано, що при ударно-хвильовому навантаженні під дією високого тиску на поверхні металу, що обробляється, утворюється мікрорельєф, пов'язаний з фазовими перетвореннями і утворенням великої кількості точкових і лінійних дефектів. Твердість поверхні зростає. Ширина зони впливу ударної хвилі залежить від схеми навантаження, пікового тиску та часу його впливу.

Розглянуто вплив цих методів на структуру та властивості поверхневих шарів, визначено оптимальні параметри впливу, що призводять до підвищення твердості, сприятливого перерозподілу напруги, зниження шорсткості поверхні.

Перелік посилань

1. Savchenko, Iu., Kozechko, V., & Shapoval, A. (2022). Method for accelerating diffusion processes when boring structural steels. *In Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*, (II, 7), 793–800.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_94
2. Didyk, R. P., & Kozechko, V. A. (2016). Forming of multi layer constructions by explosion welding. *Chernye metally*, (7), 66–70.
3. Bohdanov, O., Protsiv, V., Derbaba, V., & Patsera, S. (2020). Model of surface roughness in turning of shafts of traction motors of electric cars. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 41–45.
<https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-1/041>
4. Savchenko, I., Shapoval, O., Kozechko, V., Markov, O., Hrudkina, N., & Voskoboynik, V. (2021). Optimization of Informative Signals Stability Along the Waveguides, *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 1–4.
<https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598675>
5. Pilipenko, S. V., Grigorenko, V. U., Kozechko, V. A., & Bohdanov, O. O. (2021). A deformation mode in a cold rolling condition to provide the necessary texture of the Ti-3Al-2.5V alloy. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 78–83.
<https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/078>
6. Savchenko, I., Shapoval, A., Kozechko, V., Voskoboynik, V., Khrebtova, O., & Shlyk, S. (2021). Mechanical loading systems safety processes modeling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1164(1), 012070.
<https://doi.org/10.1088/1757-899x/1164/1/012070>

ABSTRACT

Purpose. Verification of the hypothesis about the possibility of obtaining a fine-grained structure of a metal as a result of processing with high-density energies.

The methods. The research was carried out on cylindrical samples with a diameter of 50 mm and a length of 300 mm, which were made of structural steel 45 in a normalized state. The thickness of the inner coaxial layer BP1 with a detonation speed $D=7.5$ km/s was 3 mm, the thickness of the outer layer BP2 with a detonation speed $D=3.5$ km/s was 40 mm. The two-layer BP charge used in the experiment increases the duration of the shock wave and at the same time protects the samples from destruction.

Findings. The mechanism of nanostructuring, in general terms, consists in the accumulation of the degree of deformation without destruction, which leads to the defragmentation of the structure with a significant increase in the density of dislocations.

One of the methods that allows you to achieve a high density of dislocations, comparable to IPD, is treatment with shock waves.

The change in the grain structure in the places of the pores indicates extremely high degrees of inhomogeneous deformation in these areas. During the passage of the shock wave in the middle of the sample, at the boundaries of the interface of phases with different densities, diffraction wave effects occur, which lead to the occurrence of shear deformations. It can be assumed that in the area of pores and microcracks, the deformation conditions are similar to those realized by some methods of intensive plastic deformation. This leads to a sharp grinding of the grain structure and a corresponding change in mechanical properties.

The originality. The paper found that the processing of steel parts with the help of high-density energy leads to a sharp grinding of the grain to the nanostructure size and, as a result, to an increase in mechanical properties. The revealed regularities make it possible to obtain optimal parameters of

high-energy processing, which lead to an increase in hardness, a redistribution of internal stresses and a decrease in surface roughness.

Practical implementation. Obtaining grains with nanostructural characteristics in the structure of the material will allow to create fundamentally new devices and materials. Such materials will have properties significantly exceeding their achieved level – which is important for many fields of engineering, medicine, biotechnology, environmental protection, defense, etc.

Keywords: *nanostructure, microhardness, high density energy, shock wave load.*