



RS Global
Journals

Scholarly Publisher
RS Global Sp. z O.O.
ISNI: 0000 0004 8495 2390

Dolna 17, Warsaw, Poland 00-773
Tel: +48 226 0 227 03
Email: editorial_office@rsglobal.pl

JOURNAL	World Science
p-ISSN	2413-1032
e-ISSN	2414-6404
PUBLISHER	RS Global Sp. z O.O., Poland
ARTICLE TITLE	ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСУ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ ХВИЛІ ПРИ ПОВЕРХНЕВО ПЛАСТИЧНОМУ ЗМІЦНЕННІ
AUTHOR(S)	Костюк С. А., Косіюк М. М., Ткачук В. П., Лужанський В. І., Костюк М. А.
ARTICLE INFO	Kostyuk S. A., Kosiyuk M. M., Tkachuk V. P., Luzhanskiy V. I., Kostyuk M. A. (2022) Research of the Pulse Parameters of a Deformation Wave at Surface-Plastic Strengthening. World Science. 2(74). doi: 10.31435/rsglobal_ws/28022022/7768
DOI	https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/28022022/7768
RECEIVED	11 January 2022
ACCEPTED	18 February 2022
PUBLISHED	22 February 2022
LICENSE	 This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License .

© The author(s) 2022. This publication is an open access article.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСУ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ ХВИЛІ ПРИ ПОВЕРХНЕВО ПЛАСТИЧНОМУ ЗМІЦНЕННІ

к.т.н. *Костюк С. А.*, Хмельницький національний університет, Україна

к.т.н., доц. *Косіюк М. М.*, Хмельницький національний університет, Україна

к.т.н., доц. *Ткачук В. П.*, Хмельницький національний університет, Україна

к.в.н., доц. *Лужанський В. І.*, Хмельницький національний університет, Україна

аспірант *Костюк М. А.*, Хмельницький національний університет, Україна

DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/28022022/7768

ARTICLE INFO

Received: 11 January 2022

Accepted: 18 February 2022

Published: 22 February 2022

KEYWORDS

plastic deformation, deformation wave, momentum, energy, parameter, hardening.

ABSTRACT

The article considers the issue of increasing the efficiency of shock energy and recording equipment for the study of the parameters of the deformation wave pulse. The review of the last researches and publications is carried out and perspective directions at designing of the special measuring equipment are established. A method is proposed and an experimental-measuring complex for the study of the momentum parameters in the deformation zone under different initial conditions is developed. The study of the parameters, of the shock pulse and micro hardness, of the strengthened material in the deformation zone using different versions, of the impact systems. It is established that when using a shock system with a step-shaped striker, the shock wave is characterized by a complex shape of the pulse. To assess the reliability of the obtained results, a test problem was solved in the environment of the Abaqus software package. When designing new technological processes of strengthening, the results of experimental studies such as the impact system and the parameters and modes of the processing process are of particular importance. It is established that the best result is shown by shock systems, which allow forming a prolonged shock pulse.

Citation: Kostyuk S. A., Kosiyuk M. M., Tkachuk V. P., Luzhanskiy V. I., Kostyuk M. A. (2022) Research of the Pulse Parameters of a Deformation Wave at Surface-Plastic Strengthening. *World Science*. 2(74). doi: 10.31435/rsglobal_ws/28022022/7768

Copyright: © 2022 Kostyuk S. A., Kosiyuk M. M., Tkachuk V. P., Luzhanskiy V. I., Kostyuk M. A. This is an open-access article distributed under the terms of the **Creative Commons Attribution License (CC BY)**. The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) or licensor are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

Вступ. При проектуванні машин ударної дії для поверхнево-пластичного зміцнення важливою характеристикою є енергія одиничного удару W_{y0} , величина якої визначає глибину залягання деформації та градієнт мікротвердості, а також частка енергії удару, яка витрачається на пружно-пластичну деформацію навантаженого матеріалу в осередку деформації. Удар розглядається у вигляді поширення по елементах ударної системи плоских акустичних хвиль, які характеризуються законом зміни деформацій або сил в часі, максимальним значенням сил – амплітудою хвилі, часом дії сил – тривалістю хвилі, інтенсивністю та енергією, що переноситься хвилею. Величина енергії одиничного удару повинна знаходитись в певних межах, так як при малій енергії забезпечується початок пластичного деформування мікрооб'ємів поверхневого шару з малим ступенем зміцнення, а при збільшенні енергії до критичної, відбувається процес перенаклепу (злущування тонких шарів металу).

Відомо, що при навантаженні матеріалу ударами з однаковою енергією при використанні різних ударних систем, перенесена енергія в зону деформацією буде різною. Це пов'язано з хвильовими процесами, що протікають в ударній системі і залежать від геометричних параметрів елементів ударної системи, фізико-механічних властивостей їх матеріалів і швидкості співударення [1].

Період такої хвилі називають ударним імпульсом. Імпульс з певними параметрами, що надходить в осередок деформації – зону контакту деформуючого тіла (індентора) з навантажуваним середовищем, і буде визначати ефективність динамічного навантаження в цілому. Для впливу на параметри ударного імпульсу необхідно мати уяву про його форму, тому розробка реєструючого обладнання для генерування та реєстрації параметрів імпульсу є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сучасному етапі розвитку науки і техніки широкого застосування набули динамічні методи впливу на об'єкти досліджень. Під час взаємодії співударяємих тіл формуються хвилі деформації, які породжують ударні імпульси. В залежності від геометричних та акустичних співвідношень співударяємих тіл можуть формуватись ударні імпульси з різними параметрами. Відомо, що в залежності від параметрів, ударний імпульс може виконувати як корисну так і руйнівну роботу. Дослідженнями хвильових процесів які виникають під час руйнування гірських порід займались [1–3] та інші.

Відомий неруйнівний ударно-імпульсний акустичний метод дослідження конструкцій в будівельній механіці [4]. Суть методу полягає у реєстрації параметрів хвилі стиску, що утворюється у товщині матеріалу під дією ударного імпульсного навантаження. Комплект обладнання складається із сейсмоприймача, генератора імпульсу ударної дії та обладнання для обробки і збереження даних, рис. 1.



Рис. 1. Обладнання для реєстрації та обробки експериментальних даних: 1 – генератор імпульсного навантаження; 2 – сейсмоприймачі; 3 – комплекс з обробки сигналу

Відомі перспективні способи динамічного зміцнення поверхнево-пластичним деформуванням (ППД), зокрема статико-імпульсна обробка (СІО), що дозволяє здійснювати зміцнення матеріалу в умовах комбінованого статичного і динамічного силового впливу. Однак, технологічні можливості більшості відомих способів ППД в управлінні параметрами якості поверхневого шару обмежені через недостатню уяву про перебіг хвильових станів в ударній системі та параметри сформованого імпульсу.

Аналіз способів і пристроїв для динамічних і комбінованих методів зміцнення із множини варіацій виконання ударних систем та застосування деформуючих елементів (ДЕ) дозволив виокремити найпоширеніші варіанти [5, 6], табл. 1.

Таблиця 1. Способи підведення енергії в зону деформації

Спосіб підведення енергії удару	Ударом інструмента		Ударом бойка по інструменту
	кулька	бойок	торець інструмента
Інструмент			
Схема способу			

Особливий інтерес представляють ударні системи з бойками ступінчатої форми, які характеризуються вищими показниками використання енергії удару. Геометричні параметри елементів ударної системи (співвідношення діаметрів і довжин бойка та інструмента відповідно) впливають на перебіг хвильових процесів, які є маловивченими і потребують подальших досліджень. Це зумовлює необхідність розробки та виготовлення спеціального вимірювального обладнання для дослідження параметрів імпульсу деформаційної хвилі в кратері деформації.

Метою роботи є: встановлення параметрів ударного імпульсу в залежності від початкових умов удару, а також виявлення ефективності використання енергії удару при поверхнево-пластичному зміцненні.

Виклад основного матеріалу досліджень. Для успішного вирішення задачі з керування параметрами процесу зміцнення необхідно знати акустико-динамічні характеристики елементів ударної системи й мати певну уяву про хвильові стани в кратері деформації і їх тривалість в залежності від початкових умов. Для ударної системи з елементів гладкої циліндричної форми задача вирішується відомими способами.

При застосуванні ударної системи з бойком ступінчатої форми ударна хвиля характеризується складною формою імпульсу, яка формується не лише за рахунок різних акустичних властивостей елементів ударної системи, а і за рахунок різного поля швидкостей.

В наш час дані, що використовуються для керування хвилями деформації носять розрізнений характер і враховують окремі фактори, що впливають на характеристики зміцненого матеріалу.

Подібні дані частіше за все отримують в ході пробних експериментів на великогабаритних чи натуральних моделях, створених при виконанні конкретних проектів. Володіючи високою точністю такі дані залишаються справедливими у відносно вузьких межах регулювання конструктивних і режимних параметрів. Саме тому вони не можуть ефективно використовуватись для нових ударних систем та технологічних процесів зміцнення на початкових стадіях проектування. Оскільки саме на початкових етапах здійснюється вибір типу конструктивних елементів ударної системи.

Головними труднощами виступають неможливість проведення експериментів в широкому діапазоні конструктивних і режимних параметрів на виробничих установках. Вирішення задачі значно спрощується, якщо застосувати малогабаритне експериментальне обладнання, для якого значно простіше забезпечити структурну зміну моделі. Варто відзначити, що згадані класи експериментальних моделей не замінюють одна одну, а доповнюють. Так при проектуванні операцій зміцнення технологічних процесів (ТП) на перших етапах необхідні експерименти в широкому діапазоні геометричних і режимних параметрів, а на другому більш точні у вузькому діапазоні.

Модель проведення експериментальних досліджень повинна відображати інформацію про початкові умови навантаження та розподіл енергії удару, форму імпульсу деформаційної хвилі, параметр пластичного відбитка та фізико-механічні властивості зміцненого шару (твердість, міцність).

Для досліджень параметрів ударного імпульсу в зоні деформації запропоновано методику та вимірювальний комплекс оригінальної конструкції (рис. 2), який складається з ударної, вимірювальної та реєструючої систем і дозволяє моделювати процес ударного навантаження при різних початкових умовах, та реєструвати параметри ударного імпульсу в зоні деформації. Стенд складається з копра, реєструючого датчика-зразка (рис. 3) та системи з підсилення і передачі сигналу на персональний комп'ютер (ПК).

Оцінка точності отриманих результатів при визначенні параметрів ударного імпульсу здійснювалась шляхом порівняння результатів отриманих в ході комп'ютерного моделювання процесу зміцнення.

Під час експерименту використовувався інструмент в торець якого вмонтовано кульку $R_i = 1,5$ мм та $R_i = 2,35$ мм виготовлену зі сталі ШХ 15 (61 HRC, $R_a = 0,1$ мкм). Величина енергії одиночного удару та статичного навантаження бойка маси m (загартованого до твердості 45 HRC та шліфованого з параметром шорсткості $R_a = 0,32$ мкм) задавалась генератором механічних імпульсів. Для досліджень виготовлялись спеціальні зразки (зі сталі 40X нормалізованої та шліфовані до $R_a = 1,25$ мкм) з можливістю встановлення датчика для реєстрації параметрів імпульсу, який виконує функцію перетворення механічної енергії в електричний сигнал.



Рис. 2. Експериментально-вимірювальний комплекс
1 – ударна система; 2 – наковальня; 3 – датчик; 4 – блок підсилення та обробки сигналу; 5 – персональний комп'ютер

Ємнісний електретний елемент моделі АСМ9767Р з вмонтованим підсилювачем сигналу (з шириною смуги пропускання частот 20 – 20000 Гц) встановлювався безпосередньо на об'єкт досліджень. Загальний вигляд вимірювального датчика відображено на рис. 3.

Дослідження впливу параметрів удару на процес зміцнення проводились в три етапи (без статичного навантаження, з статичним навантаженням інструмента F_{cmi} , з статичним навантаженням бойка та інструмента F_{cm1} , F_{cmi}) при постійній енергії удару $W_{y\delta}$.

Схеми навантажень бойка та інструмента при експериментальних дослідженнях відображені на рис. 4.



Рис. 3. Загальний вигляд датчика для вимірювання ударного імпульсу

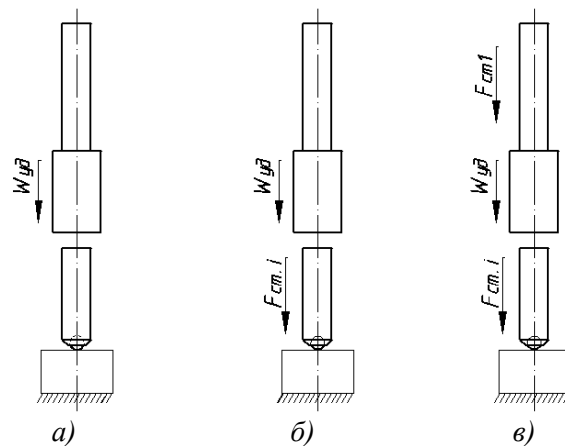


Рис. 4. Схеми навантажень бойка та інструмента:
а – без статичного навантаження; б – з статичним навантаженням інструмента; в – з статичним навантаженням бойка та інструмента

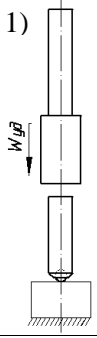
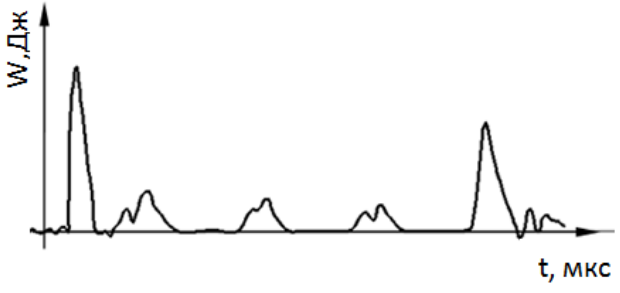
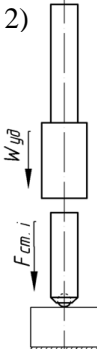
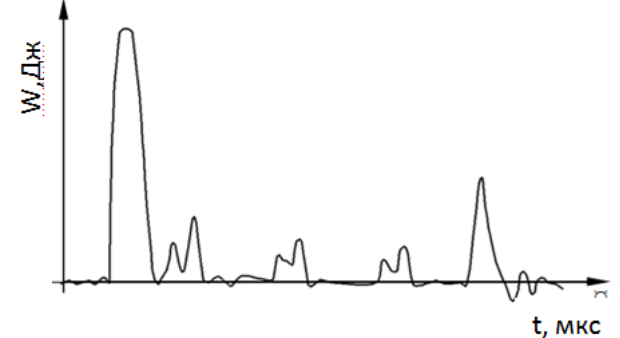
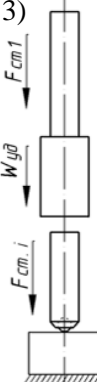
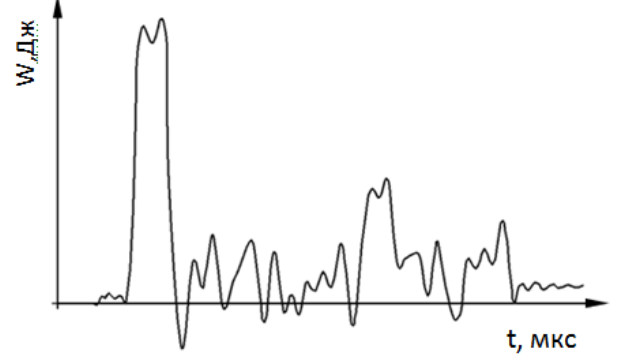
Дослідження проводились в три етапи (без статичного навантаження, з статичним навантаженням інструмента $F_{cmi} = 40$ Н, з статичним навантаженням бойка та інструмента $F_{cm1} = 150$ Н, $F_{cmi} = 40$ Н), при постійній енергії удару $W_{y\delta} = 2,35$ Дж. Матеріал зразка сталь 40Х, нормалізована до твердості $HV^{100} = 313$.

Результати експериментальних досліджень наведені в табл. 2.

Експериментальні графіки ударного імпульсу переносились в координати тарувального графіка, після чого проводилась оцінка параметрів ударного імпульсу.

На рис. 5 наведено графік для схеми 2 (табл.2).

Таблиця 2. Результати експериментальних досліджень

Початкові умови		Результати експериментальних досліджень		
Схема навантаження	Умови навантаження	Діаметр відбитка, мм	Мікротвердість, HV_{100}	Форма імпульсу
1) 	$W_{y\partial} = 2,35$ Дж; $R_i = 1,5$ мм.	2,115	345	
2) 	$W_{y\partial} = 2,35$ Дж; $F_{cm.i} = 40$ Н; $R_i = 1,5$ мм.	2,23	412	
3) 	$W_{y\partial} = 2,35$ Дж; $F_{cm.i} = 40$ Н; $F_{cm.i} = 150$ Н; $R_i = 1,5$ мм.	2,28	430	

При статичному навантаженні інструмента амплітуда ударного імпульсу зростає, а енергія в зоні деформації досягла значення $W = 1,77$ Дж. Також збільшилась тривалість ударного імпульсу. Спостерігається підвищення мікротвердості та діаметра пластичного відбитка.

Аналіз результатів експериментальних досліджень геометричних параметрів пластичного відбитка показав, що сприятливі умови передачі енергії удару ($W_{y\partial} = 1 - 5$ Дж) через інструмент в заготовку створюються при статичному навантаженні інструмента $F_{cm.i} = 20 - 60$ Н. Подальше збільшення величини статичного навантаження в меншій мірі впливає на процес передачі енергії.

Під час проведення експериментів було помічено, що в момент удару бойок ударним торцем досягав вільного торця інструмента і після зіткнення змінював напрямок вектора швидкості руху на протилежний відскакуючи на деяку висоту. Даний факт свідчить про неповне використання енергії удару так як в момент відскоку бойок володіє деякою частиною енергії, яка після роз'єднання ударних торців не приймає участі в процесі хвильового деформування і вільно затухає в ньому. Це підтверджується експериментальними графіками

форми імпульсу. З графіків видно, що сили головного ударного імпульсу миттєво наростають та мають малу тривалість, а форма ударного імпульсу шпилеподібна (табл. 2, схема 1, 2). Після удару бойок під впливом відбитої хвилі підноситься на деяку висоту та здійснює наступний удар з меншою енергією, після чого спостерігається повне затухання ударної хвилі.

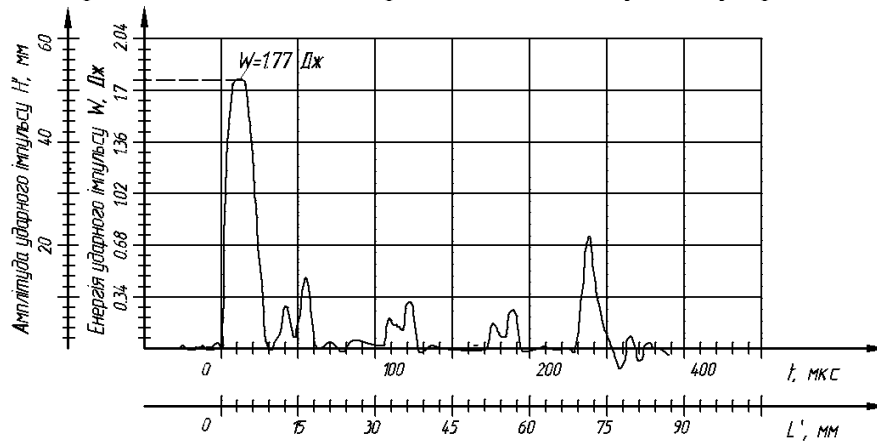


Рис. 5. Графік ударного імпульсу для умов:
 $W_{y0} = 2,35 \text{ Дж}; F_{cm1} = 40 \text{ Н}; R_i = 1,5 \text{ мм}$

В зв'язку з цим виникає актуальне питання підвищення коефіцієнта використання енергії та розширення технологічних можливостей ППД. Для вирішення даної задачі в роботі запропоновано нове рішення яке дозволяє збільшити активний час удару та запобігає роз'єднанню ударних торців бойка, та інструмента і сприяє більш повному використанню енергії удару за рахунок статичного навантаження бойка (табл. 2, схема 3) [7].

Оптимальні значення статичного навантаження для бойка ступінчастої форми, масою $m = 0.35 \text{ кг}$ визначались теоретично в залежності від величини енергії удару ($W_{y0} = 1 - 5 \text{ Дж}$), перевірялись експериментально і лежать в межах $F_{cm1} = 80 - 300 \text{ Н}$.

В результаті дослідження ударної системи з ступінчастим бойком (при статико-імпульсному навантаженні) побудовано графік ударного імпульсу, рис. 6.

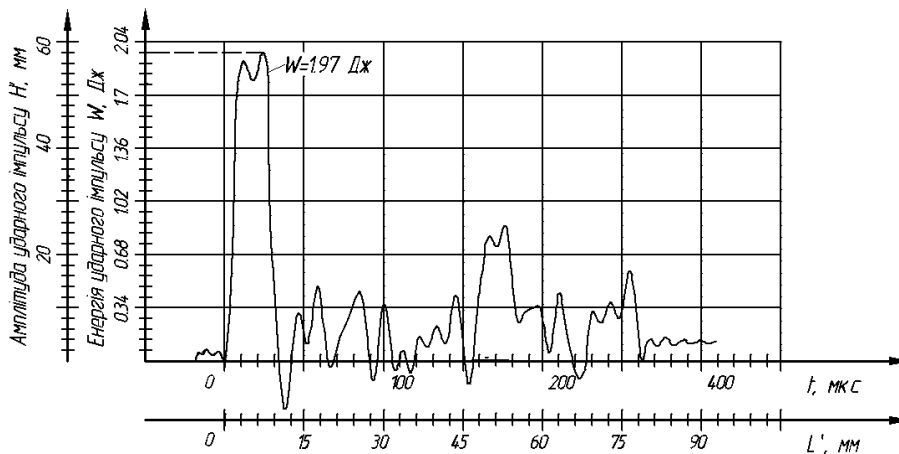


Рис. 6. Графік ударного імпульсу для схеми 3 (табл.2)

За такої схеми навантаження тривалість ударного імпульсу та амплітуда зростають. В ударній системі формується пролонгований ударний імпульс, який складається з основної та додаткової (хвостової) частини. Така форма імпульсу формується за рахунок рекуперації відбитих хвиль, геометричних співвідношень елементів ударної системи (зокрема ступінчастої форми бойка при співвідношенні довжин інструмента і бойка, як 1/3), а також оптимального статичного навантаження бойка та інструмента.

Дослідним шляхом встановлено вплив параметрів статичного навантаження на зміну мікротвердості. Результати експериментальних досліджень зведені в табл. 2 і відповідають середнім значенням за результатами трьох вимірювань.

По отриманим експериментальним даним побудовані діаграми які відображають вплив статичного навантаження бойка та інструмента на мікротвердість зміцненого шару зразка, рис. 7.

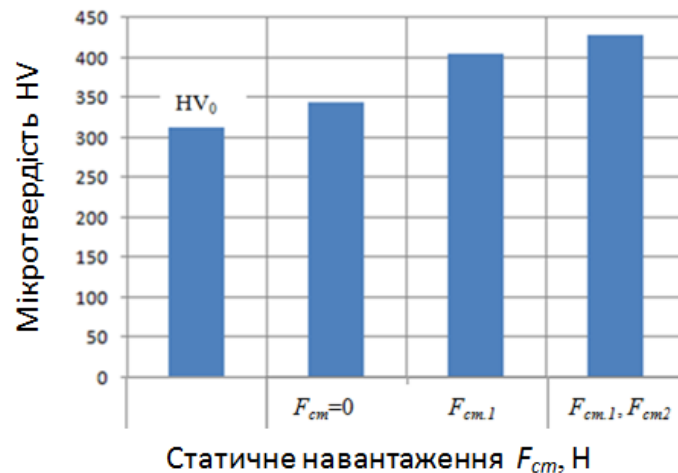


Рис. 7. Графічне відображення впливу статичного навантаження бойка та інструмента на зміну мікротвердості поверхневого шару

Аналіз отриманих результатів показав, що схема з використанням статичного навантаження бойка та інструмента при однаковій енергії удару забезпечує підвищення мікротвердості до 20% у порівнянні з традиційною схемою обробки (без статичного навантаження), що вказує на зростання коефіцієнта використання енергії удару. Встановлено, що кращий результат коефіцієнта корисної дії системи ($\eta = 83\%$) зафіксовано для схеми 3, а найменше значення відповідає схемі 1 ($\eta = 74\%$).

Висновки. Розглянуто шляхи підвищення ефективності використання енергії удару деформаційної хвилі при поверхнево-пластичному зміцненні. Розроблено експериментально-вимірвальний комплекс для досліджень параметрів імпульсу деформаційної хвилі (в залежності від початкових умов).

За результатами досліджень виявлено основні параметри статико-імпульсного зміцнення та встановлено їх вплив на величину мікротвердості зміцненої поверхні. Проведено дослідження параметрів ударного імпульсу в зоні деформації при різних схемах навантаження та параметрів мікротвердості. Кращий результат ($\eta = 83\%$) забезпечує схема з статичним навантаженням інструмента та комбінованим навантаженням ступінчатого бойка при наступних режимах обробки: $W_{уд} = 2,35$ Дж; $R_i = 1,5$ мм; статичне навантаження бойка $F_{см1} = 150$ Н; статичне навантаження інструмента $F_{смi} = 40$ Н. При співвідношенні довжин інструмента і бойка, як 1/3 тривалість ударного імпульсу та амплітуда зростають. За таких умов в ударній системі формується пролонгований ударний імпульс деформаційної хвилі, який складається з основної та додаткової (хвостової) частини.

Подальші дослідження будуть спрямовані на виявлення закономірностей зміни параметрів імпульсу деформаційної хвилі в залежності від геометричних та акустичних параметрів елементів ударної системи. Отримані результати можуть використовуватись при біполярному статико-імпульсному зміцненні зовнішніх поверхонь деталей машин.

ЛІТЕРАТУРА

1. Алимов О.Д., Манжосов В.К., Еремьянц В.Э., Невенчаный Ю.В. Расчет динамического внедрения инструмента в обрабатываемую среду (препринт). Фрунзе: Илим, 1980. 44 с.
2. Еремьянц В.Э. Влияние формы ударного импульса на процесс взаимодействия инструмента с обрабатываемой средой. Фрунзе: Илим, 1981. 59с.
3. Алимов О.Д., Манжосов В.К., Еремьянц В.Э., Мартыненко Л.М. Расчет ударных систем с неторцевым соударением элементов. Фрунзе: Илим, 1979. 109 с.
4. Кунщиков Б.К., Кунщикова М.К. Общий курс геофизических методов разведки. Москва: Недра, 1996. 430с.
5. Костюк С.А. Технологічне забезпечення підвищення працездатності пальців сферичних шарнірів статико-імпульсною обробкою: дис. к-та тех. наук: 05.02.08/ Тернопільський нац. техн. університет ім. Пулюя. Тернопіль, 2021. 236 с. Retrieved from <http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/35992/5/dis.pdf>
6. Энгельбрехт Ю.А., Нигул У.К. Нелинейные волны деформации. Москва: Наука, 1981. 256 с.
7. Костюк С.А., Косіюк М.М. Підвищення ефективності використання енергії удару при статико-імпульсному зміцненні поверхневим пластичним деформуванням. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Хмельницький, 2018. № 4. С. 48–56.