

Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2306-6744

DOI: 10.37128/2306-6744-2021-2

# Вібрації в техніці та технологіях



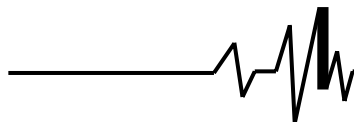
**Всеукраїнський науково-технічний журнал**

**Ukrainian Scientific & Technical Journal**

# **Вібрації в техніці та технологіях**

**№ 2 (101)**

**Вінниця 2021**

**ВІБРАЦІЇ В  
ТЕХНІЦІ ТА  
ТЕХНОЛОГІЯХ**

Журнал науково-виробничого та навчального  
спрямування Видавець: Вінницький національний  
аграрний університет

Заснований у 1994 році під назвою “Вібрації в техніці та  
технологіях”

*Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової  
інформації*

КВ № 16643-5115 ПР від 30.04.2010 р.

*Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та  
технологіях” / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. – Вінниця,  
2021. – 2 (101) – 144 с.*

*Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного  
університету (протокол №12 від 29.06.2021 р.)*

*Періодичне видання включено до Переліку наукових фахових видань  
України з технічних наук (Категорія «Б» Наказ Міністерства освіти і науки  
України від 02.07.2020 р. № 886)*

**Головний редактор**

**Калетнік Г.М.** – д.е.н., професор,  
академік НААН, Вінницький національний  
аграрний університет

**Заступник головного  
редактора**

**Адамчук В.В.** – д.т.н., проф., акад. НААН,  
Національний науковий центр “Інститут  
механізації та електрифікації сільського  
господарства”

**Відповідальний секретар**

**Солона О.В.** – к.т.н., доц., Вінницький  
національний аграрний університет

**Члени редакційної колегії**

**Булгаков В.М.** – д.т.н., професор, академік  
НААН, Національний університет  
біоресурсів і природокористування України

**Граняк В.Ф.** – к.т.н., доцент, Вінницький  
національний аграрний університет

**Деревенько І.А.** – к.т.н., доцент,  
Національний університет «Львівська  
політехніка»

**Зіньковський А.П.** – д.т.н., професор,  
Інститут проблем міцності імені Г. С.  
Писаренка НАН України

**Купчук І.М.** – к.т.н., доцент, Вінницький  
національний аграрний університет

**Матвєєв В.В.** – д.ф.-м.н., професор,  
академік НАН, Інститут проблем міцності  
імені Г.С. Писаренка НАН України

**Надуть В.П.** – д.т.н., професор, Інститут  
геотехнічної механіки імені М.С. Полякова  
НАН України

**Ольшанський В.П.** – д.ф.-м.н., професор,  
Харківський національний технічний  
університет сільського господарства імені  
Петра Василенка

**Полєвода Ю.А.** – к.т.н., доцент, Вінницький  
національний аграрний університет

**Севостьянов І.В.** – д.т.н., професор,  
Вінницький національний аграрний  
університет

**Твердохліб І.В.** – к.т.н., доцент, Вінницький  
національний аграрний університет

**Токарчук О.А.** – к.т.н., доцент, Вінницький  
національний аграрний університет

**Цуркан О.В.** – д.т.н. доцент, Вінницький  
національний аграрний університет

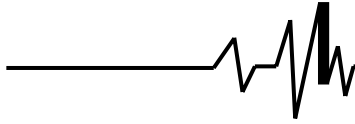
**Зарубіжні члени редакційної колегії**

**Максімов Джордан Тодоров** – д.т.н., проф., Технічний Університет Габрово (Болгарія)

Технічний редактор **Замрій М.А.**

Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний  
університет, тел. 46 – 00– 03

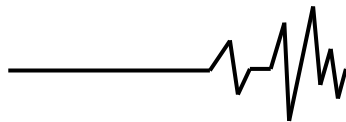
Сайт журналу: <http://vibrojournal.vsau.org/> Електронна адреса: [vibration.vin@ukr.net](mailto:vibration.vin@ukr.net)

**З М І С Т****1. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ТА МАШИН**

<i>Булгаков В. М., Солоня О. В., Ігнат'єв Є. І.</i> <b>ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ФРОНТАЛЬНО НАВИШЕНОЇ ГИЧКОЗБИРАЛЬНОЇ МАШИНИ ПРИ КОЛИВАННЯХ У ПОВЗДОВЖНЬО-ВЕРТИКАЛЬНІЙ ПЛОЩИНІ</b> .....	5
<i>Севост'янов І. В., Мельник О. С., Краєвський С. О., Горбаченко А. А.</i> <b>ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДЦЕНТРОВОГО ПОДРІБНЮВАЧА ЗЕРНОВОЇ СИРОВИНИ</b> .....	13
<i>Надутый В. П., Чолишкіна В. В., Курілов В. С.</i> <b>ИЗВЛЕЧЕНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ЗАДАНОЙ КРУПНОСТИ И ПЛОТНОСТИ ИЗ ГОРНОЙ МАССЫ ВИБРАЦИОННЫМ МЕТОДОМ</b> .....	27
<i>Ольшанський С. В., Сліпченко М. В., Твердохліб І. В., Купчук І. М.</i> <b>КОЛИВАННЯ ІМПУЛЬСНО НАВАНТАЖЕНОГО ОСЦИЛЯТОРА З КВАДРАТИЧНИМ ОПОРОМ У СКЛАДІ ДИСИПАТИВНОЇ СИЛИ</b> .....	35
<i>Степаненко С. П., Котов Б. І., Грушецький С. М., Рудь А. В.</i> <b>МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ НА ПОВЕРХНІ ВІБРОЖИВИЛЬНИКА ЗА УМОВ ВВЕДЕННЯ ЙОГО В АСПІРАЦІЙНИЙ КАНАЛ СЕПАРАТОРА</b> ...46	
<i>Polievoda Y.</i> <b>APPLICATION OF VIBRATION EFFECTS IN BIOFUEL PRODUCTION</b> .....	56
<i>Граняк В. Ф., Гайдамак О. Л.</i> <b>НАБЛИЖЕНИЙ СПОСІБ РОЗРАХУНКУ ЗЕРНОПОТОКУ В ВЕРТИКАЛЬНОМУ ЦИЛІНДРИЧНОМУ ВІБРОРЕШЕТІ</b> .....	62
<i>Возняк О. М., Штуць А. А., Замрій М. А.</i> <b>РОЗРОБКА МІКРОПРОЦЕСОРНОГО КОНТРОЛЕРА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЛІНІЙНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ РУХОМИХ ОРГАНІВ ВИКОНАВЧИХ МЕХАНІЗМІВ ВІБРАЦІЙНИХ МАШИН</b> ....	71

**2. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛООБРОБКА**

<i>Котов Б. І., Грищенко В. О., Панцир Ю. І., Герасимчук І. Д.</i> <b>МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ТЕПЛОАСОСНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ</b> .....	85
<i>Сивак Р. І., Гунько І. В., Залізник Р. О.</i> <b>ЗАСТОСУВАННЯ ЛІНІЙ ТОКУ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ КІНЕМАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК В СТАЦІОНАРНИХ ПРОЦЕСАХ ПЛАСТИЧНОЇ ТЕЧІЇ МЕТАЛУ</b> .....	92
<i>Грицун А. В., Бабин І. А.</i> <b>ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ДІЙКОВОЇ ГУМИ ПЕРЕМІННОГО ПЕРЕРІЗУ</b> .....	99
<i>Rutkevych V.</i> <b>INVESTIGATION OF TRANSITIONAL PROCESSES IN THE ADAPTIVE SYSTEM OF HYDRAULIC DRIVES OF THE MECHANISM FOR CUTTING AND UNLOADING STALK FODDER</b> .....	107
<i>Гайдамак О. Л., Гунько І. В., Паладій М. С.</i> <b>ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ ПОРОШКОВИХ ЧАСТИНОК ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ</b> .....	115
<i>Trukhanska O</i> <b>IMPROVEMENT OF QUALITY INDICATORS OF THE PROCESS OF SOWING OF ROW CROPS</b> ..	124
<i>Руткевич В. С., Кушнір В. П.</i> <b>РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ ДЕФОРМУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЙ ПРОШИВОК ДЛЯ ОБРОБКИ З НАКЛАДАННЯМ УЛЬТРАЗВУКУ</b> .....	135

**Руткевич В. С.**

к.т.н., доцент

**Кушнір В. П.**

магістрант

**Вінницький  
національний аграрний  
університет****Rutkevych V.**

Ph.D., Associate Professor

**Kushnir V.**

master's student

**Vinnitsia National  
Agrarian University****УДК 621.9.048.6****DOI: 10.37128/2306-8744-2021-2-15**

## **РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ ДЕФОРМУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЙ ПРОШИВОК ДЛЯ ОБРОБКИ З НАКЛАДАННЯМ УЛЬТРАЗВУКУ**

*Розглянута можливість підвищення ефективності та розширення технологічних можливостей процесу деформуючого протягування, шляхом вивчення контактних явищ і силових характеристик процесу деформуючого протягування (прошивання) з накладанням на інструмент ультразвукових коливань.*

*Зазначено основні переваги деформуючого протягування з накладанням ультразвуку, серед яких слід виділити значне зниження силових параметрів процесу, зменшення рівня залишкових напружень, підвищення точності оброблювання деталей. А також, накладання ультразвуку дозволяє обробляти деталі з металу та сплавів, обробка яких в звичайних умовах неможлива і вимагає спеціальних прийомів. Відзначено неможливість використання відомих конструкцій протяжок та прошивок при прошиванні з накладанням на інструмент ультразвукових коливань, оскільки прошивка повинна мати всі розміри пов'язані по акустичним параметрам і деформуючий елемент повинен бути посаджений на оправку з натягом для створення хорошого акустичного контакту між оправкою і елементом.*

*Розроблено збірні деформуючі прошивки для обробки отворів з накладанням поздовжніх ультразвукових коливань та запропоновано методику розрахунку їх деформуючих елементів на міцність. Виконані розрахунки показали, що розрахункові напруження відрізняються від допустимих не більше як на 15-20 %. З приведених розрахунків видно, що деформуючий елемент може руйнуватись, як під дією робочого навантаження в процесі прошивання, так і під дією термічних напружень після виходу елемента з оброблюваного отвору. Зазначена відмінність результатів досліджень може пояснюватися тим, що порядок міцності при розтягу величина, що має значну зону розсіювання і в різних дослідженнях вона різна.*

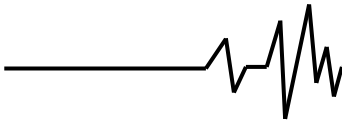
*Результати досліджень на міцність деформуючих елементів можна використати в інженерних розрахунках при проектуванні збірного інструменту для протягування отворів з ультразвуком.*

**Ключові слова:** машинобудування, деформуюче протягування, прошивка, ультразвук, напружений стан, твердий сплав, деформуючий елемент, міцність елементу.

**Вступ.** Постійно зростаючі вимоги до надійності, економічності, підвищення терміну служби сільськогосподарських машин і конструкцій диктують необхідність створення та впровадження нових ефективних енерго-

ресурсозберігаючих технологій, що поліпшують експлуатаційні характеристики металів на всіх етапах життєвого циклу виробів [1, 2].

Високопродуктивні технологічні процеси обробки деталей методом холодного



пластичного деформування отримали все більш широкого застосування в різних галузях машинобудування України. Найбільшого поширення отримало деформуюче протягування, що використовується в сучасному машинобудуванні при обробці точних отворів з низькою шорсткістю, для чорнових операцій виправлення трубних заготовок та різних матеріалів перед подальшою обробкою.

В той же час результати вітчизняних і закордонних науковців показують, що одним з можливих способів інтенсифікації процесів обробки деталей холодним пластичним деформуванням є використання ультразвуку. При накладанні ультразвуку на інструмент значно знижуються силові параметри процесу, зменшується рівень залишкових напружень, підвищується точність оброблюваних деталей. Накладання ультразвуку дозволяє обробляти деталі з металу та сплавів, обробка яких в звичайних умовах неможлива і вимагає спеціальних прийомів [3, 4].

Результати цього дослідження, спрямовані на підвищення ефективності та розширення технологічних можливостей процесу деформуючого протягування, вивчення контактних явищ і силових характеристик процесу деформуючого протягування (прошивання) з накладанням на інструмент ультразвукових коливань є актуальним завданням.

**Мета досліджень.** Вивчення основних закономірностей впливу ультразвуку на силові параметри процесу, контактні явища, точність і стан оброблюваної поверхні, а також підвищення стабільності роботи інструменту з наступним створенням на цій основі нового технологічного процесу і високоефективного інструменту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Експлуатаційні властивості заготовок високоресурсних виробів, оброблюваних деформуючим протягуванням, типу втулок і труб, забезпечують високу якість обробленої поверхні отвору. Залежно від їх призначення вимоги до обробленої поверхні різні. До великої групи деталей, типу втулок і труб (втулки плунжерної пари, циліндри амортизаторів), ставляться високі вимоги лише по шорсткості. Для підвищення міцності відповідальних деталей іншої групи (корпуси гідроциліндрів) до їх поверхонь ставляться високі вимоги не лише до шорсткості, але і до ступеня зміцнення. У цьому випадку необхідну якість визначають два основні показники: шорсткість і ступінь деформаційного зміцнення. Експлуатаційні характеристики деяких деталей (наприклад, підшипників ковзання) визначаються і їх зносостійкістю, яка в значній

мірі залежить від шорсткості. До поверхонь отворів інших високоресурсних деталей (отворів в корінних або шатунних шийках колінчастих валів) ставляться високі вимоги до втомлювальної міцності і зносу, тому в параметрах показників їх якості використовують не лише шорсткість і наклеп, а й ресурс використаної пластичності, що характеризує ступінь мікрodefектності деформованого матеріалу [5, 6].

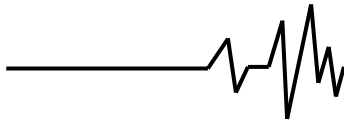
Отже, експлуатаційні властивості різних груп деталей визначаються окремими параметрами якості поверхневого шару: шорсткістю, глибиною і ступеню наклепу, ресурсом використаної пластичності або їх різними поєднаннями. Кожен з цих показників якості залежить від всієї сукупності технологічних параметрів процесу деформуючого протягування (технологічних режимів, геометричних параметрів інструменту та заготовки).

На сьогоднішній день проводяться масштабні дослідження по вивченню процесу деформуючого протягування. Науковцями різних країн вивчена механіка контактної взаємодії інструмента з виробом, контактні тиски, характеристика тертя, неконтактні зони деформації, умови навантаження деформованих елементів і методи їх розрахунку на міцність, силові навантаження інструмента, характеристики якості оброблюваної поверхні [3, 7, 8].

Вказані дослідження дозволили широко використовувати процес обробки отворів в деталях типу втулок і труб твердосплавними деформованими протяжками і прошивками. Але більш широкому використанню даного процесу перешкоджають великі силові навантаження, що виникають на інструменті, оброблюваної деталі і робочому органі верстата [8]. Крім того, при обробці ряду деталей не допустимо достатньо високі рівні залишкових напружень, що виникають в процесі деформуючого протягування. Неточності форми, що виникають при обробці деформуючим протягуванням, обмежують коло деталей отримання яких можливе було б з використанням даного процесу. Обробка деталей з металу та сплаву, таких як нержавіючі сталі і титанові сплави, вимагає використання спеціальних дороговартісних змащувальних матеріалів, при цьому нанесення та видалення даних змащувальних матеріалів знижує продуктивність процесу [8, 9].

В силу вище вказаних причин, можливості процесу деформуючого протягування, що володіє беззаперечними перевагами, використанні далеко не повністю.

З можливих способів інтенсифікації процесів обробки деталей холодним



пластичним деформуванням є використання ультразвуку, що дозволяє формувати сукупність необхідних експлуатаційних властивостей виробів [3, 8, 10]. Застосування ультразвукових коливань в технологічних процесах знайшло широке промислове застосування, охопивши практично всі процеси, починаючи від металургії та закінчуючи машинобудуванням. Дослідники даного технологічного процесу зазначають значне зниження силових параметрів процесу, зменшення рівня залишкових напружень, підвищення точності оброблювання деталей [3, 8]. Деформує протягування з накладання ультразвуку на інструмент дозволить обробляти деталі з металу та сплавів, обробка яких в звичайних умовах неможлива і вимагає спеціальних прийомів.

Науковою основою для розробки цього методу були: сучасна теорія пластичної деформації і зміцнення та результати дослідження процесів, технології та обладнання, заснованих на використанні ультразвуку. При цьому необхідно відзначити дослідження по впливу ультразвуку на закономірності пластичної деформації і обробки різних матеріалів таких вчених як: Маркова О.І., Кудрявцева І.В., Северденка В.П., Клубовіча В.В., Степаненка А.В., Розенберга Л.Д., Казанцева В.Ф., Макарова Л.О., а також роботи безпосередньо в області розробки технології ультразвукової зміцнюючої обробки різних матеріалів і її впровадження в різні області машинобудування [3, 4, 8].

В наукових працях Роземберга Л.Д., Макарова Л.О., Посвятенка Е.К., Турича В.В. зазначено, що ультразвукова обробка забезпечує необхідний вплив на об'єкт обробки на мікро- і субмікрорівні [8-11]. Ультразвукова обробка дозволяє істотно модифікувати структуру і властивості поверхневих шарів оброблюваних матеріалів шляхом високоенергетичного впливу. Така обробка дозволяє формувати в поверхневому шарі градієнтну мікроструктуру, подрібнювати структуру металів, змінювати фазовий склад.

Ультразвукова обробка являє собою прогресивну технологію фінішної обробно-зміцнюючої обробки металів тиском, дозволяючи замінити класичні статичні методи поверхневого пластичного деформування за схемами кочення і ковзання - накатування та

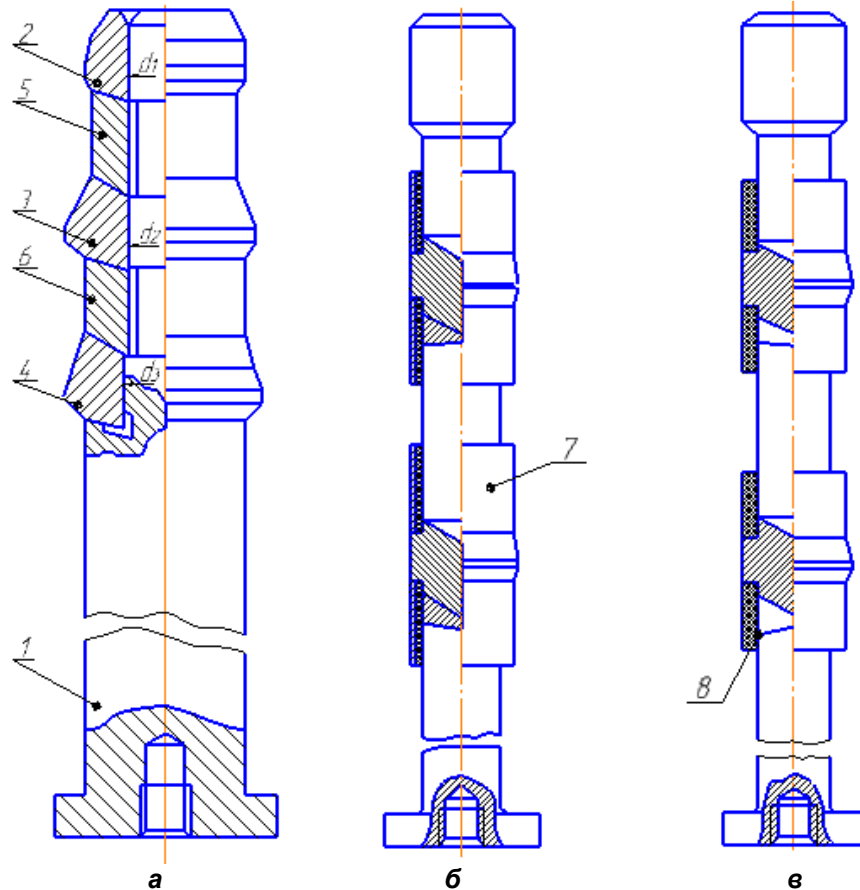
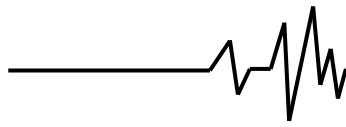
вигладжування. В результаті впливу ультразвукових коливань значно знижується опір металу пластичної деформації [8].

Численні дослідження відкрили широкі можливості застосування ультразвуку при обробці вуглецевих сталей, легованих і жароміцних сплавів, титанових і алюмінієвих сплавів, чутливих і твердих матеріалів. Ультразвукова обробка значно виграє відносно інших методів, маючи ряд незаперечних переваг таких як: відсутність інтенсивного механічного впливу на вироби, що може привести до їх деформації; відсутність термічного впливу, яке може привести до перегріву металу і зміни властивостей; можливість обробки широкої номенклатури деталей, в тому числі з високою вихідною твердістю; висока відтворюваність і повторюваність за рахунок точного управління параметрами обробки, а також висока продуктивність.

Тому актуальною науковою задачею є дослідження процесу обробки деталей холодним пластичним деформуванням з накладанням ультразвуку на інструмент.

#### **Основні результати досліджень.**

При прошиванні з накладанням ультразвукових коливань використовувати відомі конструкції протяжок і прошивок не має можливості, оскільки прошивка повинна мати всі розміри, пов'язані по акустичним параметрах і деформує елемент повинен бути посаджений на оправку з натягом для створення хорошого акустичного контакту між оправкою і елементом [7, 8]. Тому для покращення технологічного процесу прошивання з накладанням ультразвукових коливань на інструмент було розроблено збірні деформуєчі прошивки (рис.1) для обробки отворів з накладанням поздовжніх ультразвукових коливань [12, 13]. Збірні деформуєчі прошивки для обробки отворів з накладанням ультразвуку на інструмент містять стержень 1 з опорним торцем та розміщені на ньому деформуєчі елементи 2, 3, 4, що розташовані між собою на відстані за рахунок дистанційних втулок 5, 6 (рис.1, а). Робоча поверхня стержня виконана у вигляді конуса з кутом нахилу 5-8°. В деяких конструкціях збірних деформуєчих прошивках втулки 7, 8 можуть бути виконані двошаровими або виконані із звукопоглинального матеріалу (рис. 1, б, в).



**Рис. 1. Збірні деформуючі прошивки для обробки отворів з накладенням поздовжніх ультразвукових коливань: а – загальний вигляд, б – прошивка з двошаровими втулками; в – прошивка з втулками із звукопоглинального матеріалу**

Розрахунок на міцність деформуючого елемента, посаженого на оправку з натягом, описано в роботі [8], при цьому в основу розрахунку покладена гіпотеза Вінклера [11], відповідно до якої осадка у будь-якій точці пружної основи прямо пропорційна прикладеному в точці тиску. Але розрахунок, даний в роботі [8], зроблений для випадку, коли радіальна сила  $P$ , що діє на деформуючий елемент, постійна. В умовах прошивання з накладанням ультразвукових коливань, радіальна сила  $P$  буде змінюватися по гармонійному закону, наприклад, по закону  $P = P_0 \cdot \sin \cdot \omega \cdot t$ , звідки випливає, що прогин деформуючого елемента і згинаючий момент будуть відрізнятися від прогину і згинального моменту при дії статичного навантаження. Крім того відома методика розрахунку [11] не враховує вплив нагріву інструмента на міцність деформуючого елемента, температура нагрівання якого може досягати 300 °С і вище.

Враховати вплив динамічного навантаження на міцність деформуючого елемента на одиницю довжини умовної балки можна зменшенням коефіцієнта постелі її на

величину  $\gamma \cdot \omega^2 \cdot S_a / g \cdot L$  [8]. В початковий період роботи прошивки, коли її температура рівна кімнатній, розрахувати елемент на міцність з урахуванням дії динамічного навантаження можна, представляючи деформуючий елемент як балку на пружній основі, коефіцієнт постелі якої рівний динамічному коефіцієнту постелі

$$K_a = K_o - \frac{\gamma \cdot \omega_2 \cdot S_e}{gL}, \quad (1)$$

де  $K_o$  – загальний (деформуючого елемента і стержня прошивки) коефіцієнт постелі (величина погонного навантаження, що визиває осадку основи, рівну одиниці [8];  $\gamma$  – гранична вага матеріалу деформуючого елемента;

$\omega = 2\pi f$  – кругова частота, де  $f$  – частота коливань;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $S_e$  – площа поперечного перерізу деформуючого елемента (умовної балки);  $L$  – висота деформуючого елемента в напрямку осі.





Підставивши у формулу (1) значення загального коефіцієнта постелі і площі

поперечного перерізу деформуючого елемента, отримаємо

$$K_{\ddot{a}} = \frac{E}{R \left( \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} - \mu \right)} + \left( \frac{(1 - \mu) \cdot R}{r} + \frac{(1 + \mu) \cdot r}{R} \right) \frac{E_c}{2(1 - \mu_c)r} - \frac{\gamma \cdot \omega^2 \pi \cdot (D^2 - d^2)}{4gL}, \quad (2)$$

де  $E$  і  $\mu$  – модуль пружності і коефіцієнт Пуассона матеріалу деформуючого елемента;  $E_c$  і  $\mu_c$  – модуль пружності і коефіцієнт Пуассона матеріалу стержня;  $D$  і  $d$  – зовнішній діаметр і діаметр отвору деформуючого елемента;  $R$  – радіус зовнішньої поверхні деформуючого елемента;  $r$  – радіус стержня прошивки.

Напруження прогину в деформуючому елементі в початковий період роботи прошивки, коли її температура рівна кімнатній, буде

$$\sigma_{i\ddot{a}} = \frac{P_p \cdot E'' \delta_0}{4 \cdot l \cdot \gamma \cdot g^2 W}, \quad (3)$$

де  $P_p$  – розрахункове раціональне навантаження, що діє на деформуючий елемент;

$$E'' \delta_0 = -C' \delta_{\ddot{a}} + \tilde{N}'' \delta_{\ddot{a}} - 0,5 \tilde{N}''' g,$$

де  $C' \delta_{\ddot{a}}; \tilde{N}'' \delta_{\ddot{a}}; \tilde{N}'''$  – числові значення похідних функцій  $\tilde{N} \varphi = \tilde{N} h \varphi \cdot \cos \varphi$  при  $\varphi = \delta_{\ddot{a}}$ , а  $\delta_{\ddot{a}} = 0,5 l_{\delta} \cdot \gamma_{\ddot{a}}$ , де  $\varphi$  – кут повороту перерізу умовної балки при прогині;  $\gamma_{\ddot{a}}$  – динамічний коефіцієнт вимірювача жорсткості умовної балки і стержня з урахуванням динамічного навантаження, рівний:

$$\gamma_{\ddot{a}} = \sqrt[4]{\pi \cdot R \cdot K_{\ddot{a}} / 2E \cdot I}, \quad (4)$$

де  $I$  – момент інерції перерізу умовної балки, рівний для елемента

$$K_0 = \frac{E}{R \left[ \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} - \mu \right]} + \left( \frac{(1 - \mu)R}{r} + \frac{(1 + \mu) \cdot r}{R} \right) \frac{E_c}{2(1 - \mu_c) \cdot r} \quad (10)$$

Умова міцності елемента буде виконуватись в тому випадку, якщо розраховане по формулі 3 напруження прогину

$$\sigma_{i\ddot{a}} \leq [\sigma_{\hat{i}\ddot{a}}], \quad (11)$$

$$I = \pi \left( \frac{R^4 - r^4}{2} - \frac{4(R^3 - r^3)^2}{g(R^2 - r^2)} \right) \quad (5)$$

$W$  – момент опору елемента прогину

$$W = \frac{9(R^4 - r^4)(R^2 - r^2) - 8(R^3 - r^3)^2}{2(R^3 - r^3) - 18(R^2 - r^2)r} \pi \quad (6)$$

$l$  – ширина контакту інструмента з деталлю.

Розрахункове навантаження визначається з виразу [14]

$$P_p = P - 2P_0, \quad (7)$$

де  $P_0$  – реакція опору умовної балки, рівна

$$P_0 = \frac{4 \cdot \pi \cdot R \cdot l_{\delta} \cdot \Delta_{\ddot{a}} \cdot \dot{A}_{\ddot{a}}}{\left[ \frac{(1 - \mu)R}{r} + \frac{(1 + \mu)r}{R} \right] (1 - \mu_c)r(1 - E\delta_0)'}, \quad (8)$$

де  $\Delta g$  – натяг на сторону деформуючого елемента на стержень прошивки;  $E\delta_0 = C\delta_{\ddot{a}0} - 0,5\tilde{N}'\delta_0 + 0,25\tilde{N}''\delta_0$ ;  $C\delta_{\ddot{a}0}; \tilde{N}'\delta_{\ddot{a}0}$  і  $\tilde{N}''\delta_{\ddot{a}0}$  – числові значення похідної функції  $\tilde{N} \varphi = \tilde{N} h \varphi \cdot \cos \varphi$  при  $\varphi = \delta = 0,5 \cdot l \cdot \gamma_0$ , де  $\gamma_0$  – загальний коефіцієнт вимірювача умовної балки і стержня, рівний

$$\gamma_0 = \sqrt[4]{\pi \cdot R \cdot K_0 / 2E \cdot I}, \quad (9)$$

де

де  $[\sigma_{\hat{i}\ddot{a}}]$  – розраховане допустиме напруження від прогину.

При пластичні деформації до 80-90 % витраченої роботи переходить в теплову енергію [9, 15], що обумовлює значний нагрів інструмента. Крім того, при обробці з



ультразвуком відбувається додатковий нагрів інструмента за рахунок поглинання ультразвуку інструментом і деталлю. Так як коефіцієнт лінійного розширення твердих сплавів в 1,5-2 рази нищий коефіцієнта лінійного розширення сталей, то в деформуючому елементі, посадженому на металеву оправку з натягом, виникають додаткові розтягуючі напруження. Дані напруження підвищують несучу здатність деформуючого елемента при надходженні його в отвір оброблюваної деталі, тому що компенсують деяку частину контактних напружень на робочій поверхні деформуючого елемента. При виході деформуючого елемента з отвору оброблюваної деталі зовнішнє навантаження знімається і він може зруйнуватись. Тому необхідно враховувати напруження, що виникає в деформуючому елементі при посадці його на стержень з натягом і наступним нагріванні в результаті переходу роботи деформації в тепло, а також в результаті поглинання ультразвуку. Відомо, що твердий сплав рахується абсолютно крихким матеріалом, пружна деформація якого закінчується крихким руйнуванням [6]. Враховуючи цей факт, термічне напруження можна розраховувати по закону Гука

$$\sigma_{\delta} = \frac{y_e}{r} E \quad (12)$$

де  $y_e$  – величина радіальної деформації поверхні отвору деформуючого елемента.

Величина радіальної деформації поверхні отвору елемента рівна [11]

$$y_{\delta} = \frac{K_c \cdot \Delta_c}{K_o}, \quad (13)$$

де  $K_c$  – коефіцієнт постелі стержня, рівний [11]

$$K_c = \frac{E_c}{(1 - \mu_c) \cdot r} \quad (14)$$

$\Delta_c$  – сумарний натяг на сторону, рівний

$$\Delta \tilde{n} = \Delta g + \Delta t, \quad (15)$$

де  $\Delta t$  – температурний натяг, обумовлений відмінністю коефіцієнтів лінійного розширення сталі і твердого сплаву.

$$\Delta t = 0,5(\alpha_{\tilde{n}} d_c - \alpha_t d_{\tilde{a}})(\dot{O}_1 - \dot{O}_2) \quad (16)$$

де  $a_c$  і  $a_e$  – коефіцієнт лінійного розширення сталі і твердого сплаву, відповідно,

$d_c$  і  $d_e$  – відповідно діаметр стержня і отвору.

$T_1$  і  $T_0$  – відповідно температура нагріву і початкова температура інструменту.

Розв'язавши рівняння 12-16 і враховуючи, що величина  $\Delta g \leq d$ , отримаємо:

$$\sigma_T = \frac{K_c [(a_c d_c - \alpha_T d_e)(T_1 - T_0) + \Delta g] E}{K_0 d_e} \quad (17)$$

В рівнянні 17  $d_c$  і  $d_e$  необхідно брати з урахуванням пружної деформації стержня і отвору, але враховуючи той факт, що величина пружної деформації стержня і отвору на декілька порядків менше діаметрів стержня і отвору ними можна знехтувати.

Умова міцності

$$\sigma_{\delta} \leq [\sigma_p], \quad (18)$$

де  $[\sigma_p]$  – допустиме напруження при розтяганні.

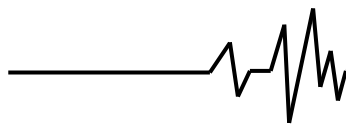
Методи розрахунку на міцність деформуючого елемента були перевірені на елементах із твердого сплаву ВК15. Для перевірки на міцність елементів під дією радіального навантаження були виготовлені елементи з наступними розмірами:  $D=22,68$  мм,  $d=12$  мм,  $b=0,7-0,9$  мм,  $L_k=20$  мм і  $\alpha=5^\circ$ . Елементи насаджувались на стержень з натягом  $\Delta g=0,0025$  мм і  $\Delta g=0,005$  мм.

Прошивання здійснювалось на швидкості 0,02 м/с, як без ультразвуку, так і з накладанням ультразвуку, з амплітудою коливаль 10 мкм. Експерименти проводились на втулках із сталі 35ХГСА, твердістю НВ 405-411. Фактична межа міцності при прогині в залежності від масштабного фактора  $\sigma_{впр}$  розраховувався за рівнянням

$$\sigma_{\delta \tilde{v} \delta} = 7,62 D^{-0,44} t_k^{-0,55} \sigma_{\delta \tilde{v} \delta} \quad (19)$$

де  $t_k$  – товщина стінки деформуючого елемента.

В табл. 1 наведено експериментальні та розрахункові дані. Як видно з табл. 1 розрахункові значення  $\sigma_{пр}$ , при яких відбувалося руйнування деформуючих елементів, близькі розрахунковому допустимому навантаженню  $[\sigma_{впр}]$ .



Таблиця 1

## Значення розрахованих руйнуючих напружень від прогину

Натяг	Оброблювана деталь		Спосіб прошивання	$\sigma_{пр}$ , ГПа	$\sigma_{впр}$ , ГПа
	$d_0$ , мм	$t_0$ , мм			
0,0025	22,12	8,98	без УЗК	1,43	1,28
0,0025	22,12	9	без УЗК	1,46	1,28
0,0025	22,14	9	без УЗК	1,46	1,28
0,0025	22,16	9,49	з УЗК	1,37	1,28
0,0025	22,15	9,50	з УЗК	1,37	1,28
0,005	22,10	9,95	без УЗК	1,11	1,28
0,005	22,13	10	без УЗК	1,14	1,28
0,005	22,10	10,5	з УЗК	1,05	1,28
0,005	22,10	10,5	з УЗК	1,05	1,28

Таким чином, з приведених розрахунків видно, що деформуючий елемент може руйнуватись, як під дією робочого навантаження в процесі прошивання, так і під дією термічних напружень після виходу елемента з оброблюваного отвору.

**Висновок.** При розрахунку на міцність деформуючих елементів насаджених на оправку з натягом в умовах ультразвукового протягування необхідно, виконання умов (11), (18). Експериментальна перевірка показала, що розрахункові напруження відрізняються від допустимих не більше як на 15-20 %. Така відмінність може пояснюватися тим, що порядок міцності при розтягу величина, що має значну зону розсіювання і в різних дослідженнях вона різна.

## Список використаних джерел

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года. *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 7–17.

2. Берник П.С., Паламарчук І.П., Липовий І.Г. Розвиток конструктивних та технологічних схем машин для обробки виробів в умовах вільного кінематичного зв'язку між деталями та робочим інструментом. *Вібрації в техніці та технологіях*. 1998. № 2 (6). С. 21–29.

3. Конов С.Г., Котобан Д.В., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Перспективы применения ультразвуковых технологий в аддитивном производстве. *Наукоёмкие технологии в машиностроении*. 2015. № 9(51). С. 28–34.

4. Посвятенко Е.К., Турич В.В., Шевченко В.І. Модифікування поверхні деталей машин ультразвуковим методом. *Вісник НТУ*. 2003. № 8. С. 28–33.

5. Матвийчук В. А., Алиев И. С.. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе

анализа деформируемости металлов: монографія. Краматорск: ДГМА, 2009. 268 с.

6. Ogorodnikov V. A., Derevenko I. A., Sivak R. I. On the Influence of Curvature of the Trajectories of Deformation of a Volume of the Material by Pressing on Its Plasticity Under the Conditions of Complex Loading. *Materials Science*. V. 54, Issue 3, 2018. P.326–332.

7. Паладійчук Ю.Б., Швець Л.В., Кондратюк Д.Г. Обробка глибоких отворів комбінованою протяжкою. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2019. №2(105). С. 86–92.

8. Розенберг О. А. Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании. Київ: Наук. думка, 1981. 288 с.

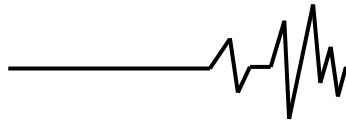
9. Посвятенко Е.К., Посвятенко Н.І., Будяк Р. В. Холодна пластична деформація як фактор підвищення оброблюваності пластичних матеріалів протягуванням. *Вісник Національного транспортного університету*. 2014. № 30(1). С. 307–315.

10. Turych V., Rutkevych V., Goncharuk N., Ogorodnichuk G. Investigation of the process smoothing with ultrasonic. *Eastern-European Journal of Enterprise technologies*. 2018. Vol. 3/1(93). P. 22–33.

11. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания: учебник. Київ: Наук. думка, 1990. 320 с.

12. Збірна деформуюча прошивка для обробки отворів з накладанням поздовжніх ультразвукових коливань: пат. №89285 Україна, МПК (2014.01) B23D 43/00. № 201314313; заявл. 09.12. 2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7. 6 с.

13. Збірна деформуюча прошивка для обробки отворів з накладанням ультразвукових коливань: пат. №119067 Україна, МПК(2006.01) B23D 43/02. № 201702787; заявл. 24.03. 2017;



опубл. 11.09.2017, Бюл. № 17. 4 с.

14. Розенберг О. А., Цеханов Ю. А., Шейкин С. Е. О некоторых закономерностях упрочнения поверхностного слоя при деформирующем протягивании. *Сверхтв. материалы*. 2005. № 4. С. 56 – 68.

15. Руткевич В.С. Моделювання процесу контактної взаємодії інструмента з деталлю із накладанням осьових ультразвукових коливань. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. №2(97). С. 61–71.

### References

1. Kablov, E.N.(2012). Stratehicheskie napravleniia razvitiia materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 hoda [Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii – Aviation materials and technologies*, № 5, 7-17 [in Russian].

2. Bernyk, P.S., Palamarchuk, I.P. & Lypovyi, I.H. (1998) Rozvytok konstruktyvnykh ta tekhnolohichnykh skhem mashyn dlia obrobky vyrobiv v umovakh vilnoho kinematychnoho zv'iazku mizh detaliamy ta robochym instrumentom [Development of design and technological schemes for processing products in conditions of a free kinematic connection between the parts of the working tool]. *Vibraciyi v tekhnici ta tekhnologiyah – Vibration in engineering and technology*, 2(6), 21-29 [in Ukrainian].

3. Konov, S.H., & Kotoban, D.V., & Syndykov, S.K., & Fatiukhin, D.S. (2015). Perspektivy primeneniia yltrazvykovykh tekhnologii v additivnom proizvodstve [Prospects for the use of ultrasonic technologies in additive manufacturing]. *Naykoemkie tekhnologii v mashinostroenii – Science-intensive technologies in mechanical engineering*, № 9(51), 28-34 [in Russian].

4. Posviatenko, E.K. & Turych, V.V. & Shevchenko, V.I. (2003). Modyfikuvannia poverkhni detalei mashyn ultrazvukovym metodom [Modification of surface of machine parts by ultrasonic method]. *Visnyk NTU – Bulletin of NTU*, 8, 28-33 [in Ukrainian].

5. Matvichuk, V. A., & Aliev., I. S. (2009). *Sovershenstvovanie protsessov lokalnoi rotatsionnoi obrabotki davleniem na osnove analiza deformiruemosti vetallov: monografia [Improving the processes of local rotary pressure treatment based on the analysis of the deformability of metals]*. Kramatorsk: DGMA [in Ukrainian].

6. Ogorodnikov, V. A., & Derevenko, I. A., & Sivak R. I. (2018). On the Influence of Curvature of the Trajectories of Deformation of a

Volume of the Material by Pressing on Its Plasticity Under the Conditions of Complex Loading. *Materials Science*, 54(3), 326-332 [in English].

7. Paladiichuk, Yu.B., & Shvets, L.V., & Kondratiuk, D.H. (2019). Obrobka hlybokyykh otvoriv kombinovanoi protiazhkoiu [Treatment of deep holes with a combined broach]. *Vseukrainskyi naukovо–tekhnichniy zhurnal «Tekhnika, enerhetyka, transport APK» – All-Ukrainian Scientific and Technical Journal. Engineering, power engineering, transport of agroindustrial complexes*, №2(105). С. 86-92 [in Ukrainian].

8. Rozenberh, O. A. (1981). Mekhanika vzaimodeistviia instrumenta s izdeliem pri deformiruiushchem protiahivani [Mechanics of interaction of the tool with a product at deforming drawing]. Kyiv: Nauk. dumka [in Ukrainian].

9. Posviatenko, E.K., & Posviatenko, H.I., & Bdiak, R. V. (2014). Kholodna plastichna deformatsiia iak faktor pidvyshchennia obrobluvanosti plastychnykh materialiv protiahuvanniam [Cold plastic deformation as a factor in increasing the machinability of plastic materials by drawing]. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu – Bulletin of the National Transport University*, № 30(1), 307-315 [in Ukrainian].

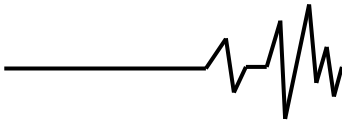
10. Turych, V. & Rutkevych, V. & Goncharuk, N. & Ogorodnichuk, G.(2018). *Eastern-European Journal of Enterprise technologies*,3/1(93), 22-33 [in Ukrainian].

11. Rozenberh, A.M., & Rozenberh, O.A. (1990). Mekhanika plasticheskoho deformirovaniia v protsessakh rezaniia i deformiruiushcheho protiahivaniia [The mechanics of plastic deformation in cutting and deformation pulling processes]. K.: Nauk. dumka [in Russian].

12. Pat. KM 89285 Ukraina. (2013). Zbirna deformuiucha proshyvka dlia obrobky otvoriv z nakladanniam pozdovzhnykh ultrazvukovykh kolyvan [Prefabricated deforming firmware for processing holes with the imposition of longitudinal ultrasonic vibrations]. *Publ.* 10.04.2014 [in Ukrainian].

13. Pat. KM 119067 Ukraina. (2017). Zbirna deformuiucha proshyvka dlia obrobky otvoriv z nakladanniam ultrazvukovykh kolyvan [Prefabricated deforming firmware for processing holes with the imposition of ultrasonic vibrations]. *Publ.* 11.09.2017 [in Ukrainian].

14. Rozenberh, O. A., & Tsekhanov, Yu. A., & Sheikin, S. E. (2005). O nekotorykh zakonomernostiakh uprochneniia poverkhnostnoho sloia pry deformiruiushchem protiahivani [On some regularities of surface layer hardening during deforming pulling]. *Sverkhtv. Materialy – Supertv. Materials*, № 4, 56 - 68 [in Ukrainian].



15. Rutkevych, V.S. Modeliuvannia protsesu kontaknoi vzaємодії instrumenta z detalliu iz nakladanniam osvych ultrazvukovykh kolyvan [Modeling of the process of contact interaction of the tool with the part with the application of axial ultrasonic vibrations]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh – Vibrations in technology and technology*, 2, 61-71 [in Ukrainian].

#### **РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ДЕФОРМИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ТА РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ПРОШИВОК ДЛЯ ОБРАБОТКИ С НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА**

*Рассмотрена возможность повышения эффективности и расширения технологических возможностей процесса деформирующего протягивания, путем изучения контактных явлений и силовых характеристик процесса деформирующего протягивания (прошивки) с наложением на инструмент ультразвуковых колебаний.*

*Указаны основные преимущества деформирующего протягивания с наложением ультразвука, среди которых следует выделить значительное снижение силовых параметров процесса, снижение уровня остаточных напряжений, повышения точности обрабатываемых деталей. А также, наложение ультразвука позволяет обрабатывать детали из металла и сплавов, обработка которых в обычных условиях невозможно и требует специальных приемов. Отмечена невозможность использования известных конструкций протяжек и прошивок при прошивке с наложением ультразвуковых колебаний, поскольку прошивка должна иметь все размеры, связанные по акустическим параметрам и деформирующий элемент должен быть посажен на оправку с натягом для создания хорошего акустического контакта между оправкой и элементом.*

*Разработаны сборные деформирующие прошивки для обработки отверстий с наложением продольных ультразвуковых колебаний и предложена методика расчета их деформирующих элементов на прочность. Выполнены расчеты показали, что расчетные напряжения отличаются от допустимых не более чем на 15-20 %. Из приведенных расчетов видно, что деформирующий элемент может разрушаться, как под действием рабочей нагрузки в процессе прошивки, так и под действием термических напряжений после выхода элемента обрабатываемого отверстия. Указаны отличия результатов исследований может*

*объясняться тем, что порядок прочности при растяжении величина, имеющая большой разброс и в различных исследованиях она разная.*

*Результаты исследований на прочность деформирующих элементов можно использовать в инженерных расчетах при проектировании сборного инструмента для протягивания отверстий с ультразвуком.*

*Ключевые слова: машиностроения, деформирующее протягивание, прошивка, ультразвук, напряженное состояние, твердый сплав, деформирующий элемент, прочность элемента.*

#### **CALCULATION ON THE STRENGTH OF DEFORMING ELEMENTS AND DEVELOPMENT OF FIRMWARE STRUCTURES FOR ULTRASONIC PROCESSING**

*The possibility of increasing the efficiency and expanding the technological capabilities of the process of deforming drawing, by studying the contact phenomena and force characteristics of the process of deforming drawing (flashing) with the imposition of ultrasonic vibrations on the tool.*

*The main advantages of deforming drawing with application of ultrasound are noted, among which it is necessary to allocate considerable decrease in force parameters of process, reduction of level of residual stresses, increase of accuracy of the processed details. Also, the application of ultrasound allows you to process parts made of metal and alloys, the processing of which in normal conditions is impossible and requires special techniques. It is noted that it is not possible to use known designs of broaches and firmware when flashing with the application of ultrasonic vibrations, because the firmware must have all the dimensions related to the acoustic parameters and the deforming element must be placed on the mandrel with tension to create good acoustic contact between the mandrel and the element.*

*Prefabricated deforming firmware for processing holes with the imposition of longitudinal ultrasonic vibrations has been developed and a method for calculating their deforming elements for strength has been proposed. The performed calculations showed that the calculated stresses differ from the allowable ones by no more than 15-20 %. From the above calculations it is seen that the deforming element can be destroyed, both under the action of the working load in the process of flashing, and under the action of thermal stresses after the exit of the element from the machined hole. This difference in the results of research can be explained by the fact that the order of tensile strength is a value that has a large*



scattering zone and in different studies it is different.

The results of research on the strength of deforming elements can be used in engineering calculations in the design of prefabricated tools for drawing holes with ultrasound.

**Key words:** mechanical engineering, deforming drawing, firmware, ultrasound, stress state, hard alloy, deforming element, element strength

#### **Відомості про авторів**

**Руткевич Володимир Степанович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: [v\\_rut@ukr.net](mailto:v_rut@ukr.net)).

**Кушнір Віталій Павлович** – студент магістратури за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: [vetalion2752@gmail.com](mailto:vetalion2752@gmail.com)).

**Руткевич Владимир Степанович** – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и оборудования сельскохозяйственного производства Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: [v\\_rut@ukr.net](mailto:v_rut@ukr.net)).

**Кушнир Виталий Павлович** – студент магистратуры по специальности 133 «Отраслевое машиностроение» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, Винница, Украина, 21008, e-mail: [vetalion2752@gmail.com](mailto:vetalion2752@gmail.com)).

**Rutkevych Volodymyr** – PhD, Associate Professor of the Department of Machinery and Equipment for Agricultural Production of Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna Str., 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: [v\\_rut@ukr.net](mailto:v_rut@ukr.net)).

**Kushnir Vitaliy** – a master's student majoring in 133 "Industrial Engineering" of Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna Str., 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: [vetalion2752@gmail.com](mailto:vetalion2752@gmail.com)).