

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

**СЕНИК АНДРІЙ АНТОНОВИЧ**

УДК 621.98.01

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ  
ЗГОРТНИХ ВТУЛОК ПІДВИЩЕНОЇ ТОЧНОСТІ  
ФОРМИ І ЯКОСТІ**

05.02.08 – технологія машинобудування

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2018

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана на кафедрі конструювання верстатів, інструментів та машин Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник**

кандидат технічних наук, доцент  
**Кривий Петро Дмитрович**,  
Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя,  
професор кафедри конструювання верстатів,  
інструментів та машин,  
Заслужений винахідник України

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Марчук Віктор Іванович**  
Луцький національний технічний університет,  
завідувач кафедри приладобудування;

кандидат технічних наук, доцент  
**Кусий Ярослав Маркіянович**  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
доцент кафедри технології машинобудування інституту  
інженерної механіки та транспорту

Захист відбудеться «14» грудня 2018 року об 11:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 58.052.03 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, корпус №2.

Автореферат розіслано «14» листопада 2018 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

А.Є. Дячун

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасне машинобудування в результаті науково-технічної революції забезпечує виготовлення засобів виробництва, які характеризуються високою енергомісткістю, продуктивністю, швидкістю переміщення виконавчих елементів, точністю їх позиціонування. Для забезпечення таких характеристик до окремих деталей і складальних одиниць машин ставляться підвищені вимоги щодо їх якості як сукупності показників, що визначають здатність виробу забезпечувати певні потреби відповідно до їх призначення.

Згортні втулки як деталі окремих складальних одиниць машин найширше використовують у приводних роликівих і втулкових ланцюгах (ПРВЛ), а також як елементи підшипників ковзання (ЕПК). ПРВЛ, у свою чергу, широко використовують у транспортних системах: автомобілях, мотоциклах, велосипедах, а також у дорожніх та сільськогосподарських машинах, вертольотобудуванні, металорізальних верстатах тощо. Згортні втулки в якості ЕПК застосовують у механізмах газорозподілу двигунів внутрішнього згоряння (підшипники в коромислах клапанів), а також у ходовій частині деяких марок автомобілів.

Інтенсивність зношування контактуючих циліндричних поверхонь значною мірою залежить від таких показників якості як точність форми поперечного перерізу внутрішньої циліндричної поверхні (ВЦП) за параметром відхилення від круглості, який впливає на дійсну площу контакту, та від фізико-механічних властивостей поверхневого шару ВЦП, а саме його мікротвердості і шорсткості.

Тому здійснення технологічного забезпечення виготовлення згортних втулок підвищеної точності форми і якості поверхневого шару з розробленням імовірнісно-статистичних методик оцінювання відхилень від круглості та мікротвердості і шорсткості віброобкочених поверхонь є актуальним завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.** Дисертаційна робота відповідає тематиці, яка передбачена переліком тематичних наукових досліджень і розробок вищих навчальних закладів III-IV рівнів акредитації та наукових установ Міністерства освіти і науки на 2012-15рр., наказ МОН України від 07.06.2011 №535, а також науковому напрямку Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (ТНТУ) в рамках науково-дослідної держбюджетної теми ДІ 95-02 «Розробка наукових основ створення надтвердої високотемпературної кераміки і методики дослідження її різальної здатності» (2002–04рр.) (номер державної реєстрації 0102U002298).

**Мета роботи і завдання дослідження.** Мета роботи – підвищення якості згортних втулок шляхом технологічного забезпечення підвищеної точності їх форми за параметром відхилення від круглості та зміцнення їх внутрішніх циліндричних поверхонь.

Для досягнення мети в роботі поставлені й вирішені такі **завдання:**

– провести огляд і аналіз прогресивних технологічних процесів виготовлення згортних втулок, існуючого технологічного спорядження для їх виготовлення та методів контролю точності їх форми за параметром відхилення від круглості;

- провести теоретичні та експериментально-статистичні дослідження величини відпружинювання заготовки і силових характеристик процесу формоутворення згортних втулок;
- розробити імовірнісно-статистичний метод визначення зусилля дорнування ВЦП згортних втулок;
- теоретично визначити відносну площу вібраційного обкочування при формуванні на ВЦП втулки регулярного мікрорельєфу із підвищеним ступенем перекриття залежно від елементів віброобкочування;
- розробити прогресивні конструкції заготовок для згортних втулок, технологічне та інструментальне спорядження для їх виготовлення, а також установку для дослідження зусилля формування згортних втулок;
- дослідити закономірності зміни зусилля формування згортних втулок при транспортуванні заготовки у транспортному каналі;
- розробити методики для оцінювання в імовірнісному аспекті точності форми ВЦП згортних втулок, ступеня зміцнення поверхневого шару при вібраційному обкочуванні та шорсткості віброобкоченої поверхні за параметром  $R_a$ ;
- розробити методику визначення очікуваної економічної ефективності від впровадження запропонованих технічних рішень у виробництво.

*Об'єкт дослідження* – процес формування згортних втулок підвищеної якості за параметром точності форми та зміцнення робочої поверхні.

*Предмет дослідження* – силові характеристики процесу формування згортних втулок, точність форми, шорсткість і ступінь зміцнення їх ВЦП.

*Методи дослідження.* Основою досліджень є системний підхід до вивчення й аналізу взаємозв'язку між конструкторсько-технологічним забезпеченням формування згортних втулок та їх якісними показниками. В основу теоретичних досліджень покладено підходи і принципи фундаментальних положень теорії пружності та пластичності, технології машинобудування й опору матеріалів, оброблення металів тиском, теорії імовірності та математичної статистики, гармонічного аналізу з використанням тригонометричних рядів Фур'є.

Достовірність теоретичних результатів перевірялась експериментальними методами з використанням сучасних стандартних високоточних приладів як, наприклад, профілометра та кругломіра і спеціально розробленого обладнання.

Обробку окремих отриманих результатів здійснювали з використанням розробленого програмного забезпечення.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

- вперше досліджено залежності для визначення загального зусилля при транспортуванні встановленої кількості заготовок (карточок) у транспортному каналі та формуванні згортних втулок у циліндричній пустотілій матриці;
- вперше запропоновано імовірнісно-статистичний метод визначення зусилля формування шкворневих втулок та отримано залежності для визначення математичного сподівання і дисперсії;
- вперше обґрунтовано й запропоновано новий параметр оцінювання відхилення від круглості – коефіцієнт наповнення профілю;

- вперше на основі теорії малої вибірки і методу ітерацій запропоновано методику визначення необхідної та достатньої кількості деформуючих і калібруючих фільтр при фінішній обробці згортних втулок;
- вперше отримано залежності для визначення величини розкриття стикового шва, на основі яких запропоновані нові конструкції втулок;
- вперше встановлено залежність між зусиллям віброобробчування і ступенем зміцнення та шорсткості за параметром  $R_a$  – середнє арифметичне відхилення профіля;
- вперше отримано закономірності зміни зусилля деформування заготовки при згортанні втулки, які статично опрацьовано за методом ітерацій і в результаті отримано усереднену закономірність, яку апроксимовано тригонометричним рядом Фур'є.

**Практичне значення отриманих результатів.** Запропонований новий технологічний процес згортання втулки забезпечує підвищену точність форми за параметром відхилення від круглості.

Експериментально підтверджено ефективність пропонувананих технологічних заходів, яка виражається у значному (майже на порядок) зменшенні відхилень від круглості поперечних перерізів згорнутих втулок.

Розроблено комплект конструкцій заготовок для згортних втулок та подано аналітичні залежності для визначення їх конструктивних параметрів.

Розроблено нові конструкції згортних втулок як для ПРВЛ, так і для вузлів машин, у яких згортні втулки виконують функції ЕПК. Особливість нових конструкцій втулок для ПРВЛ полягає в тому, що стиковий шов непрямолинійний. Це дає можливість уникнути лінійного контакту стикового шва як своєрідного леза по всій довжині втулки, а для ЕПК наявність одного або декількох наскрізних отворів на бічній поверхні втулки, що є ключем кутової орієнтації, яка забезпечить у зоні контакту валика із внутрішньою поверхнею згортної втулки її мінімальне відхилення від круглості.

Запропоновані нові конструктивні рішення для формування згортних втулок, які забезпечують підвищення точності форми за параметром відхилення від круглості і підвищення стійкості калібруючих фільтр за рахунок їх повороту на певний кут за один подвійний хід пуансона.

Розроблена методика визначення конструктивних параметрів заготовок згортних втулок і елементів пристрою для їх калібрування на основі імовірнісного підходу.

Технічна новизна розробок захищена 10-ма деклараційними патентами України на корисні моделі. На НВ ПМП “Промтехконструкція” (м. Краматорськ) і на заводі приводних ланцюгів “DITTON” (м. Даугавпілс) знайшла застосування “Методика визначення деяких конструкторських параметрів заготовок згортних втулок і пристрою для їх калібрування на прикладі згортної втулки ТРД 38-3116-12Т.

Окремі патенти впроваджено на приватному підприємстві “Кам’янець-Подільськаагрегат” – Пат. 112745; на ТОВ “БІГМА” м. Тернопіль – Пат. 92908, на ТОВ “Кабельний завод” м. Кам’янець-Подільськ – Пат. 115787.

Сумарний економічний ефект від застосування склав 19220 грн.

Окремі результати роботи використовуються у навчальному процесі при підготовці фахівців галузі знань 13 «Механічна інженерія» за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» при викладанні дисциплін: «Технологічні методи виробництва заготовок деталей машин», «Технологія обробки деталей тиском» у ТНТУ ім. І. Пулюя.

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні та експериментальні дослідження за темою дисертації автор отримав особисто. Роботи [8, 16] одноосібні. У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: визначення на основі гармонічного аналізу відхилень від круглості достатньої кількості гармонік [1], отримання залежностей для визначення максимальних і мінімальних значень розкриття стикового шва згортних втулок [2], застосування різних варіантів механізмів повороту деформуючих фільтер [3], розроблення геометричної моделі транспортування плоскої карточки у радіусному каналі і визначення сили тертя та методи фіксації зусиль в процесі формування втулок [4, 5], розроблення методики визначення імовірності попадання стикового гвинтового шва у контакт з валиком [6], отримання залежностей для визначення впливу елементів режиму вібраційного обкочування на відносну площу віброобкочування [7], розроблення корекції профілів деформуючих інструментів та методів контролю і статистичної оцінки відхилень від круглості та кратності калібрувань [9-13, 15], розроблення технологічних процесів виготовлення корсетної втулки [14].

Особистий внесок здобувача в експериментальних дослідженнях полягає у розробленні методик і залежностей для оброблення експериментальних даних та визначення складових економічного ефекту, а також створення установки для здійснення експериментів. Постановка завдань, аналіз і трактування отриманих результатів виконані спільно з науковим керівником.

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні положення та результати роботи доповідались й обговорювались на: Наук.-практ. конф. ТНТУ ім. І. Пулюя у 2001, 2002, 2004-2013, 2017-2018.; Міжнар. ювіл. наук.-практ. конф. «Навчальна, науково-практична і інноваційна діяльність вищої школи в сучасних умовах». (Оренбур, 2001), II Всеукр. наук.-техн. конф. «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (Суми, 2002); Міжнар. симпозіумі українських інженерів-механіків у Львові (Львів, 2003, 2011); Міжнар. наук.-техн. конф. студ., асп. та молодих вчених (Севастополь, 2004); Міжнар. наук.-техн. конф. «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (Краматорськ, 2006); International Manufacturing Science & Engineering Conference (Atlanta, 2007); VII Всеукр. молод. наук.-техн. конф. «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (Одеса, 2007); допов. «Приводы и компоненты машин» (Москва, 2013(06)); Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (Херсон, 2014, 2016, 2017); VI міжнар. наук.-практ. конф. «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»: (Чернігів, 2016).

Результати роботи доповідались й отримали позитивний відгук на розширеному засіданні науково-технічного семінару ТНТУ ім. І. Пулюя (2018).

**Публікації.** Результати наукових досліджень викладено у 26 друкованих працях, з яких: 6 статей у фахових виданнях України, 2 у закордонних виданнях (США і РФ), одна з яких входить до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS, 10 патентів України (деклараційні і на корисні моделі), 8 тез у збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій та симпозіумів.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 155 найменувань та додатків. Загальний обсяг дисертації 245 сторінок, в тому числі 195 сторінок основного тексту, 93 рисунки, 15 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульовані мета й завдання досліджень, подана її наукова новизна і практична цінність.

У першому розділі *«Огляд і аналіз прогресивних технологічних процесів виготовлення згортних втулок та методів контролю точності їх форми»* поданий аналіз існуючих технологій і технологічного спорядження виготовлення втулок. Відзначено проблеми, які мають місце у досягненні точності форми і якості робочих поверхонь згортних втулок, охарактеризовано існуючі методи оцінювання таких параметрів точності форми як відхилення від круглості поперечних перерізів ВЦП втулок, відхилення від прямолінійності профілю цієї поверхні.

Відзначено, що для оцінювання точності форми циліндричних поверхонь, використовувався гармонічний аналіз.

Показано, що значний внесок у синтез та удосконалення технологічних процесів виготовлення згортних втулок і підвищення їх якості здійснили українські вчені Глущенко І.П., Дубиняк С.А., Кривий П.Д., Медвідь М.В., Огнівець В.А., Павлище В.Т., Петрик О.О., а також зарубіжні – Азнаурян Р.В., Іскандеров І.А., (Азербайджан); Балцер Н.Е., Саленієкс Н.К. (Латвія); Жуков К.П., Івашков І.І., Колев К.С., Лебедєв Л.В., Осіпов Ю.К., Проскураков Ю.Г., Романовський Б.В., Тулін Ю.В., Фот А.П., Шведов І.А. (РФ); Rachner H. G. (ФРН); Kuntzman P. (Франція) та інші.

На основі здійсненого аналізу виявлено певні недоліки існуючих технологічних процесів виготовлення згортних втулок та недосконалості у конструкціях заготовок втулок і технологічного спорядження, що не забезпечує належну точність форми за параметром відхилення від круглості.

Охарактеризовано на технологічність згортні втулки як найважливіший елемент шарнірів механізмів та вузлів машин. Відзначено певні недосконалості конструкцій згортних втулок як, наприклад, не вказано допуски форми, зокрема за параметром відхилення від циліндричності, а також посадки спряжень втулка-отвір внутрішньої пластини ПРВЛ.

Показано, що за характером навантаження згортні втулки поділяються на два класи:

- до першого відносяться втулки як елементи шарнірів ПРВЛ, які передають значні зусилля і сприймають згинні та нормальні напруження;

- до другого класу віднесені згортні втулки як антифрикційні ЕПК, які з натягом запресовані у отвори корпусів.

Відзначено невідповідність такого параметра точності форми як відхилення від круглості фізичній моделі контакту циліндричних поверхонь спряження втулка-валик.

Підкреслено, що в існуючих методах контролю точності форми такі параметри як відхилення від круглості і середнє квадратичне відхилення від круглості подаються як детерміновані величини, хоча такі параметри є випадковими величинами з певними законами розподілу.

Детальний огляд та аналіз значної кількості наукової літератури, авторських свідоцтв та патентів на винаходи і корисні моделі показав, що питання технологічного забезпечення виготовлення згортних втулок підвищеної точності форми і якості з точки зору наукового обґрунтування та розроблення нових технологічних процесів виготовлення згортних втулок, нових конструкцій заготовок таких втулок і створення нових імовірно-статистичних методів оцінювання точності форми, ступеня зміцнення і шорсткості науково не обґрунтовано.

**У другому розділі «Теоретичне дослідження спотворення форми U- подібних заготовок і силових характеристик процесу формоутворення згортних втулок»** подано теоретичне обґрунтування величини відпружинення U- подібних листових заготовок при їх пружно-пластичному деформуванні; здійснено теоретичне дослідження загального зусилля, прикладеного до пуансона при послідовному деформуванні заготовки у транспортному каналі; теоретико-експериментально-статистичне дослідження приведеної сили тертя і величини відпружинення при переміщенні прямокутної карточки у цьому каналі; теоретичне дослідження відносної площі віброобкочування з підвищеним ступенем перекриття, а також запропоновано імовірно-статистичний метод визначення зусилля дорнування ВЦП шкворневих втулок.

Прийнявши відповідні припущення, а саме: заготовку (прямокутну карточку) розглядаємо як балку; в процесі її деформування має місце чистий згин; радіус кривини серединної поверхні у всіх точках однаковий і дорівнює  $\rho = R_{\text{в}} + t/2$ , тут  $R_{\text{в}}$  – радіус ВЦП;  $t$  – товщина пластини (рис. 1).

Використавши діаграму розподілу напружень за товщиною  $t$  стінки згортної втулки і записавши рівняння осі зігнутої балки у припущенні, що у всіх точках простий згин, а також рівняння осі балки у випадку пружно-пластичної задачі й скориставшись теоремою про розвантаження, знаходимо радіус серединної лінії  $A'SB'$ , який дорівнює  $O'A = O'C = O'B' = \rho_{\text{зал}}$ . (рис. 2), після деформування балки і звільнення її з матриці:

$$\rho_{\text{зал}} = (\rho' \cdot (R_{\text{в}} + t/2)) / (\rho' - (R_{\text{в}} + t/2)) = (\rho \cdot \rho') / (\rho' - \rho), \quad (1)$$

де  $\rho'$  – радіус кривини зігнутої серединної лінії для випадку, коли маємо простий згин.

Отримано залежність для визначення кута  $\gamma$ , який характеризує величину у відпружинювання U- подібної заготовки при її пружно-пластичному деформуванні:

$$\gamma = (\pi/2)(1 - (\rho/\rho_{\text{зал}})). \quad (2)$$



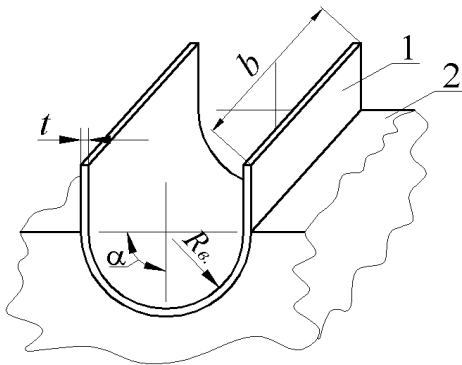


Рис. 1. Схематичне зображення U- подібної заготовки з ідеально пластичного матеріалу, отриманої гнуттям у штампі: 1 - заготовка, 2 - нижня напівматриця

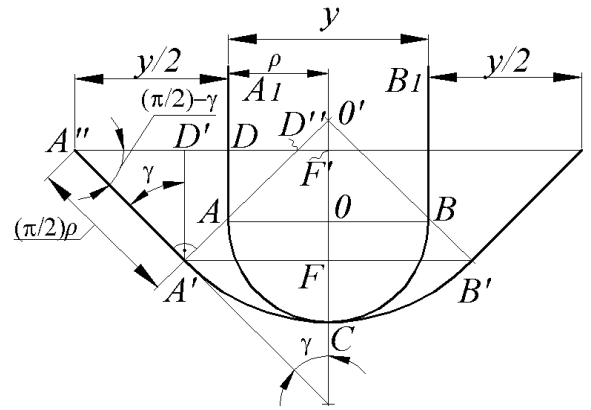


Рис. 2. Форма середньої лінії  $A'CB'$  після розкриття штампа і величина відпружинювання  $y$

Величину  $\rho_{зал}$  прирівняли до одного із коренів  $\rho_3 = -2R_e \cdot \cos((\varphi/3) + (4\pi/3))$  кубічного рівняння, отриманого з умови рівності згинного моменту у будь-якому перерізі сумі зовнішніх моментів, що діють на балку, де  $\varphi = 2\alpha$  (рис. 1). Використавши рис. 2, величину відпружинювання  $y$  знаходимо із залежності:

$$y = 2 \cdot A''D'' = 2 \cdot ((\pi/2) \cdot \rho \cdot \sin(\pi/2) [1 - \rho / (-2R_e \cdot \cos((\varphi/3) + (4\pi/3)))]). \quad (3)$$

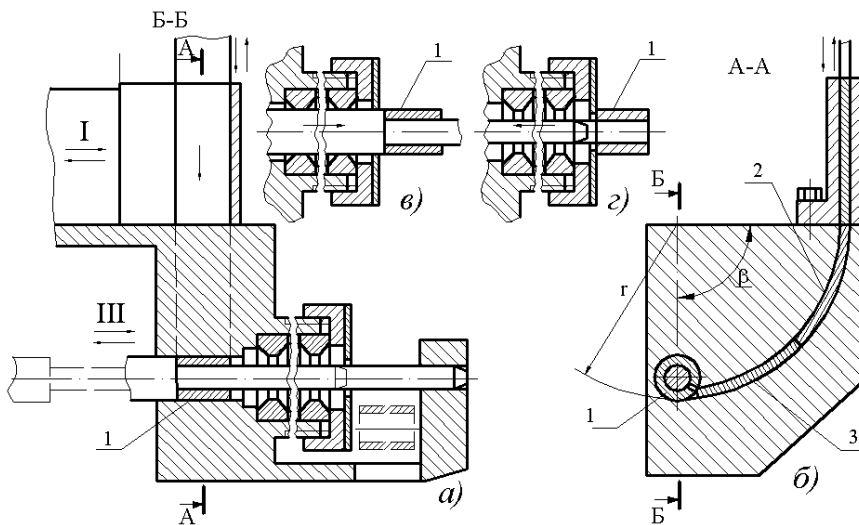


Рис. 3. Пристрій для формування згортної втулки із карточки за запропонованою технологією: а) головний вигляд; б) переріз А-А; в), г) фрагментарні зображення оправки відповідно у правому і лівому крайніх положеннях калібруючого вузла

Запропоновано формування згортної втулки 1 здійснювати із попередньо здеформованої у транспортному каналі 2 прямокутної плоскої карточки 3 (рис. 3).

Для реалізації такого технологічного процесу, скориставшись розрахунковими схемами (рис. 4 і рис. 5), отримано залежності для визначення таких параметрів:

- величини відпружинювання  $Y$ :

$$Y = r(1 - \cos(\pi d_c / 2r)) - (C(2r + t) - t) / 2 + \sqrt{((C(2r + t) - t) / 2)^2 - r^2 \sin^2(\pi d_c / 2r)}, \quad (4)$$

де  $r$  – радіус лінії симетрії радіусного каналу;  $d_c$  – середній діаметр втулки;  $C = 1 / (1 - E'((2r/t) + 1)^{1-n})$  – коефіцієнт відпружинювання;  $E'$ ,  $k$ ,  $n$  – постійні величини для даного матеріалу, які характеризують інтенсивність зміцнення і визначаються із залежності:

$$E' = 3k / ((2+n) \cdot E), \quad k = \sigma_k / \epsilon_k^n, \quad n = (\lg \sigma_k - \lg \sigma_s) / (\lg \epsilon_k - \lg \epsilon_s),$$

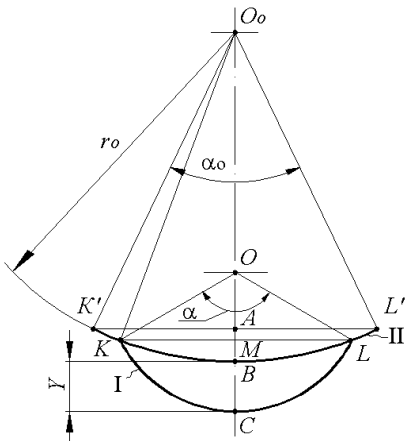


Рис. 4. Розрахункова схема для визначення величини відпружинювання  $Y$  у транспортному каналі

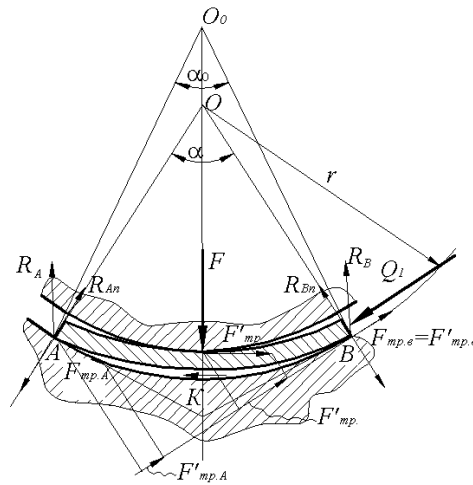


Рис. 5. Розрахункова схема для визначення сили транспортування карточки у транспортному каналі

де  $\sigma_k$ ,  $\varepsilon_k$  – відповідно істинні напруження і відносна деформація границі міцності;  
 $\sigma_s$ ,  $\varepsilon_s$  – відповідно істинні напруження і відносна деформація границі текучості;  
 $E$  – модуль пружності. Максимальне значення зусилля, що діє на карточку з боку пуансона, визначається за формулою:

$$P_{2\max} = \frac{[\sigma_m] \cdot t^2 \cdot b}{2r_{\text{вн.з}}} \left\{ \sqrt{1 - \left[ \frac{2(r_{\text{вн.вн.}} + \frac{t}{2})}{d_{\text{вн.з.}} + 2(r_{\text{вн.вн.}} + \frac{t}{2})} \right]^2} + f \cdot \frac{2(r_{\text{вн.вн.}} + \frac{t}{2})}{d_{\text{вн.з.}} + 2(r_{\text{вн.вн.}} + \frac{t}{2})} \right\}, \quad (5)$$

де  $r_{\text{вн.вн.}}$  – внутрішній радіус втулки;  $b$  – ширина карточки;  $\sigma_m$  – границя текучості;  $d_{\text{вн.з.}}$  – діаметр зовнішньої циліндричної поверхні втулки;  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання;  $r_{\text{вн.з.}}$  – радіус формуючої фільери.

Залежність  $Y$  від радіуса транспортного каналу проілюстровано на рис. 6.

Кількість карточок  $m$ , які можуть одночасно знаходитись у транспортному каналі, з умови міцності на зминання по торцях карточки визначається із залежності:

$$m = ([\sigma_{\text{зм.}}] \cdot t \cdot b - P_M - P_1 + Q_1) / Q_1, \quad (6)$$

де  $[\sigma_{\text{зм.}}]$  – допустима границя міцності на зминання матеріалу карточки;  $P_1$  – зусилля, яке необхідно прикласти до карточки, щоб здеформувати її у транспортному каналі;  $P_M$  – зусилля, прикладене до торця карточки щоб перемістити на величину  $l = p \cdot d_c$ ;  $Q_1$  – зусилля, яке необхідне для переборення сил тертя, що виникають від пружної деформації однієї карточки при транспортуванні її у транспортному каналі.

Графічна залежність (6) проілюстрована на рис. 7.

Використавши розрахункову схему (рис. 8) для визначення приведеної сили тертя  $F_{\text{тр.пр.}}$ , отримано залежність:

$$F_{\text{тр.пр.}} = (8E \cdot b \cdot t^2 \cdot \psi \cdot Y_{\text{пр.}} \cdot \cos \beta) / (\pi^2 \cdot d_c^3),$$

де  $\psi$  – коефіцієнт тертя;  $Y_{\text{пр.}}$  – приведена величина відпружинювання;

$$\beta = (\pi \cdot d_c) / (2(r + (t/2))).$$

Запропоновано методику експериментального визначення приведеної сили тертя  $F_{\text{тр.пр.}}$ , реалізовану на експериментальній установці, схематично зображеній на рис. 9.

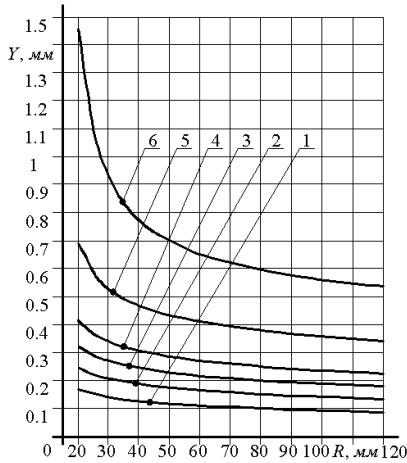


Рис. 6. Графіки залежності величини  $Y$  від  $R$  для карточок заготовок втулок різних ПРВЛ: 1, 2, 3, 4, 5, 6 відповідно для ланцюгів з кроками 9,525; 12,7; 15,875; 19,05; 24,5; 38,1 мм (Сталь 45,  $E=2 \cdot 10^5$  Н/мм<sup>2</sup>;  $n=0,17$ ;  $\sigma_t=300$  Н/мм<sup>2</sup>)

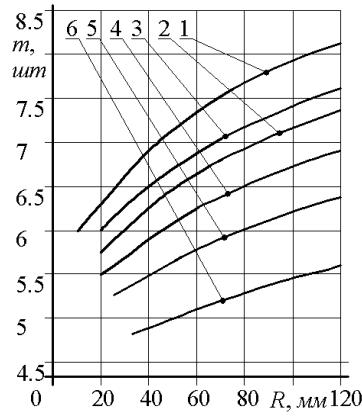


Рис. 7. Графік залежності кількості карточок  $m=\psi(R)$  для втулок різних ПРВЛ; 1; 2; 3; 4; 5; 6 відповідно для втулок ланцюгів з кроком 9,525; 12,7; 15,875; 19,05; 25,4 і 38,1 мм

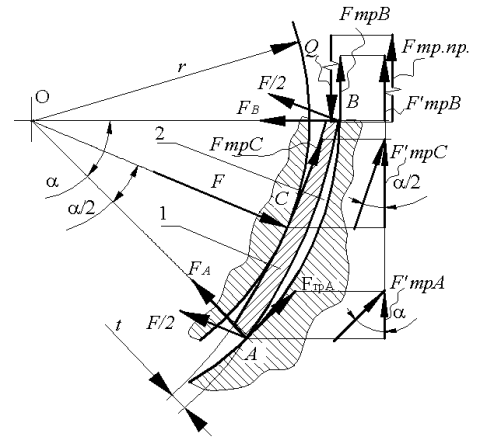


Рис. 8. Розрахункова схема для визначення приведеної сили тертя при транспортуванні карточки - 1, у транспортному каналі - 2

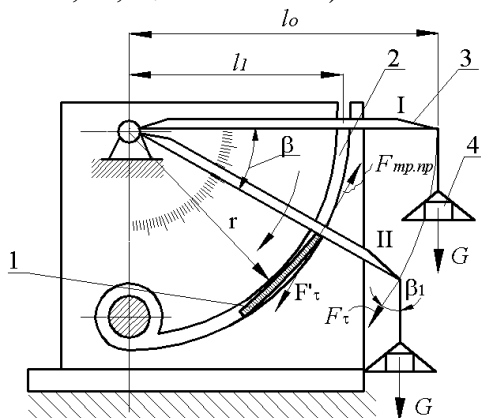


Рис. 9. Конструктивна схема пристрою для експериментального визначення приведеної сили тертя

певний кут  $\beta_1$ , змінюючи при цьому плече прикладеної сили, тобто  $M_{mp} = G_{кр} \cdot g \cdot \cos \beta_1 \cdot l_0$ , де  $g$  – прискорення вільного падіння.

Звідси за формулою  $F_{mp,np} = (G_{кр} \cdot g \cdot \cos \beta_1 \cdot l_0) / (r + (t/2))$  визначали значення приведеної сили тертя. Достовірність теоретичних результатів підтверджено експериментально.

Для зміцнення поверхневого шару, особливо для згортних втулок як ЕПК, виготовлених із бронз або латуней, запропоновано вібраційне обкочування із формуванням частково регулярного мікрорельєфу з підвищеним ступенем перекриття, що дозволяє отримувати збільшену відносну площу віброобкочування  $S_{в.в.}$ . Запропонована формула для визначення цієї площі:

$$S_{в.в.} = ((\pi \cdot \rho_{кр} + 8e_{кр.}) / (4\pi \cdot \rho_{кр} + 8e_{кр.})) \cdot 100\%$$

де  $e_{кр.}$  – величина ексцентриситету кривошипа,  $\rho_{кр}$  – ширина канавки утвореної віброобкоченням.

Суть методики полягає у наступному. У транспортний канал 2 встановлювали карточку 1 так, щоб важіль 3 знаходився у горизонтальному положенні. Внаслідок відпружинювання виникає момент тертя

$$M_{mp} = F_{mp,np} \cdot l_0 = F_{mp,np} \cdot (r + (t/2)),$$

де  $l_0$  – плече прикладеної сили.

На шальку 4 встановлювали вантаж масою  $G$  і поступово її збільшували до значення  $G_{кр}$ , коли статичне тертя переходить в кінематичне, і важіль повертався за годинниковою стрілкою на

У третьому розділі «Прогресивні конструкції заготовок для згортних втулок та технологічно-інструментальне забезпечення для їх виготовлення» подано прогресивні конструкції заготовок згортних втулок (рис. 10) і технологічне спорядження з радіусним та прямолінійним транспортним каналом для формування втулок підвищеної точності форми, нова технологія виготовлення і застосування шкворневих втулок ходової частини деяких транспортних засобів; пружні фільтери для калібрування згортних шкворневих втулок.

Особливістю розроблених конструкцій заготовок згортних втулок для ПРВЛ, поданих на рис. 10, є те, що самі заготовки являють собою криві бруси із зменшеною по відношенню до плоских прямокутних карточок стійкістю, конструктивні параметри яких отримані на основі формул з урахуванням відповідних технічних обмежень.

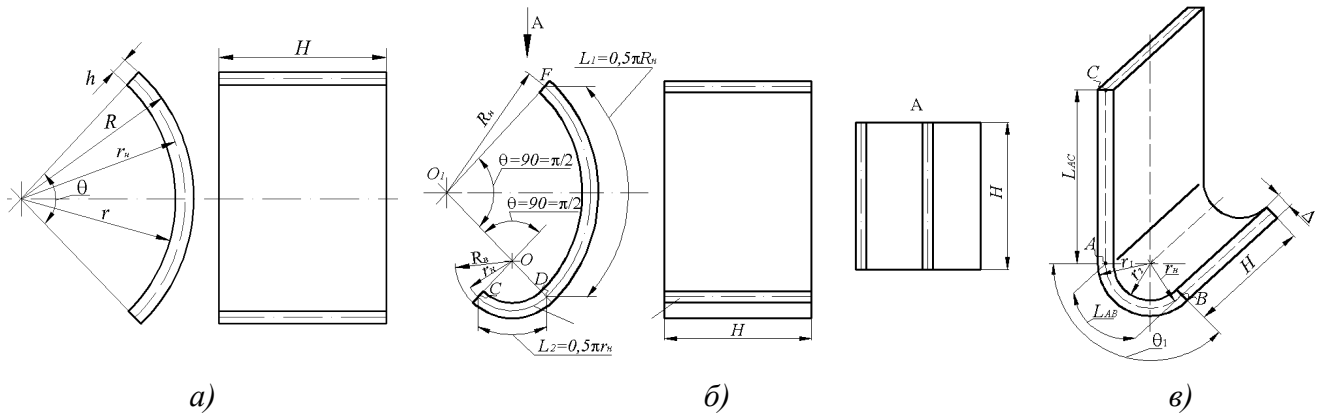


Рис. 10. Схематичне зображення нових конструкцій заготовок згортних втулок для ПРВЛ: а) у вигляді частково циліндричної оболонки; б) у вигляді спряжених різної кривини циліндричних оболонок; в) у вигляді спряження плоскої карточки з частково циліндричною оболонкою

Запропоновано нові конструкції згортних втулок для ПРВЛ, особливостями яких є: по-перше, виконання стикового шва комбінованим – прямолінійно-гвинтовим, а по-друге, розкриття на задану величину прямолінійного стикового шва, яке служило б ключем для кутової орієнтації згортних втулок з метою недопущення лінійного контакту стикового шва, як своєрідного леза, з валиком, що сприяло б підвищенню зносостійкості шарнірів ПРВЛ.

Конструкція втулок з комбінованим стиковим швом схематично зображена на рис. 11.

Довжина  $\Delta$  прямолінійних ділянок стикового шва дорівнює товщині пластин внутрішньої ланки ПРВЛ, а кут  $\omega$  гвинтової частини стикового шва визначається із залежності  $\omega = \arctg \pi D / (H - 2\Delta)$ , де  $D$  і  $H$  – відповідно, зовнішній діаметр і висота втулки. Дана конструкція забезпечує постійну довжину контакту гвинтової частини стикового шва з валиком  $L_k$ , що сприяє при однакових умовах рівномірному зношуванню шарнірів ПРВЛ. Величина  $L_k$  визначається із формули:

$$L_k = 0,11 \arctg 0,0036 \sqrt{F_{on} \left( (H - 2\Delta)^2 + \pi^2 D_{min}^2 \right) / (D_{min} - d_{max})}$$

де  $F_{on}$  – проекція опорної поверхні шарніра;  $D_{min}$  – мінімальний внутрішній діаметр втулки;  $d_{max}$  – максимальний діаметр валика.

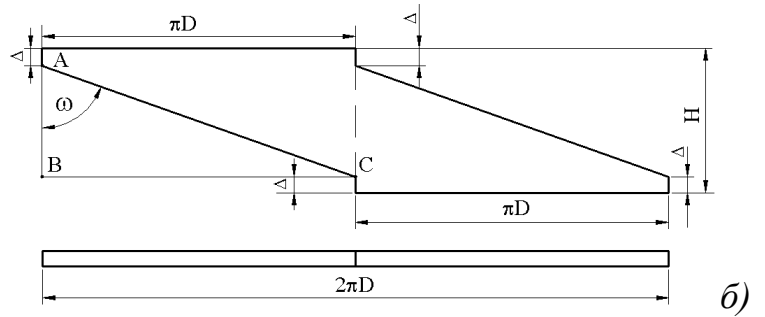
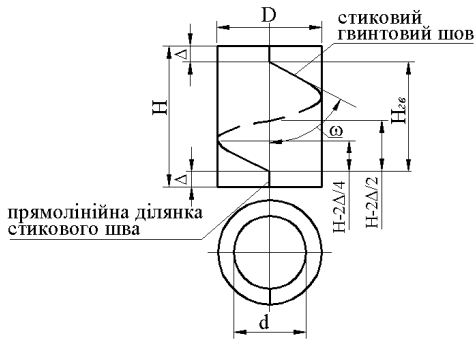


Рис. 11. Згортна втулка з комбінованим стиковим швом – а), та розгортка – б)

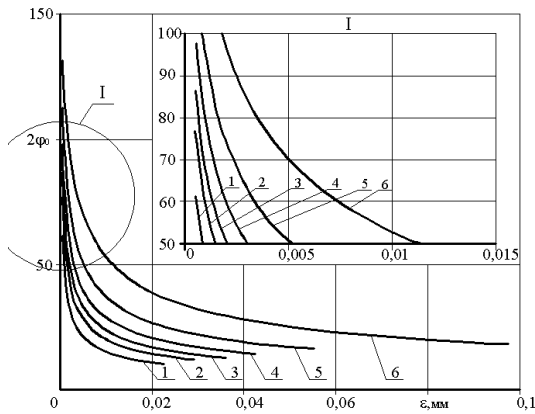


Рис. 12. Графіки залежності зміни величини кута контакту в шарнірі ПРВЛ від радіального зазору  $\epsilon$ ; 1, 2, 3, 4, 5, 6 – відповідно для ПРВЛ з кроком: 9,525; 12,7; 15,875; 19,05; 25,4; 38,1 мм

Відзначено, що максимально можлива довжина лінії контакту стикового шва втулки з валиком  $L_{max}=L_k+2\Delta$ , яка у 1,9...2,44 разів менша за довжину лінії контакту традиційного прямолинійного стикового шва з поверхнею валика.

Отримана залежність для визначення кута зони контакту ВЦП втулки з валиком  $2\varphi_0 = 0,035 \arctg 0,0025 \sqrt{F_{on} / \epsilon_{min}}$ , тут  $\epsilon_{min}$  – мінімальний зазор в шарнірі, яка проілюстрована на рис. 12.

Для згортних втулок з розкритим стиковим швом (рис. 13) отримані залежності для визначення максимальних і мінімальних величин розкриття стикового

шва відповідно на зовнішній  $h_{z.min}$  і внутрішній  $h_{в.min}$  циліндричних поверхнях як для втулок із фасками на їх торцях, так і для втулок із округленнями.

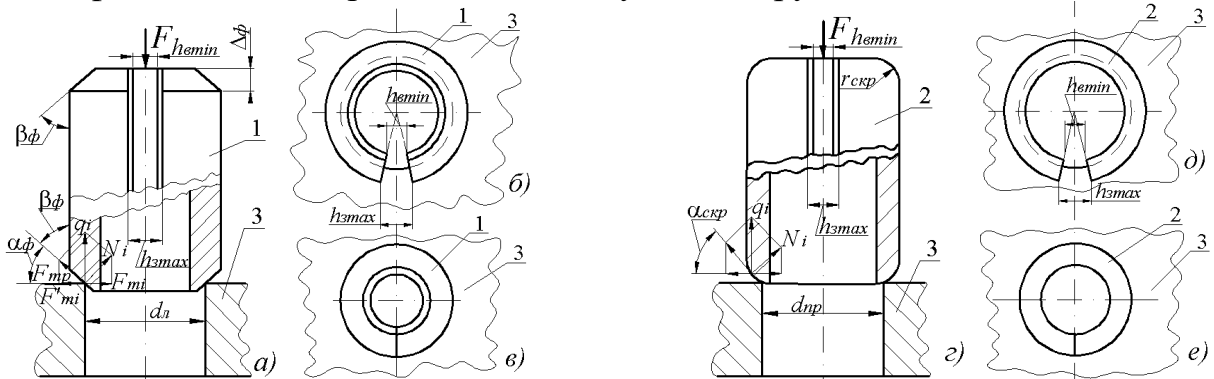


Рис. 13. Згортна втулка з прямолинійним розкритим стиковим швом а, б, в та г, д, е – відповідно перед запресуванням та після запресування у отвори внутрішніх пластин; 1 і 2 – відповідно згортні втулки з фаскою і скругленням; 3 – внутрішня пластина

Для прикладу подана формула для визначення максимальної величини розкриття стикового шва на ВЦП втулки з фасками має вигляд:

$$h_{в,max} = (d_{нл,max} + 2\Delta_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \beta_{\phi} - 2D_{ем,min} + d_{нл,min} + d_{ем,max}) \times \sin[180^{\circ} \cdot (1 - D_{ем,min} / (d_{нл,max} + 2\Delta_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \beta_{\phi} - D_{ем,min} + d_{нл,min}))]. \quad (7)$$

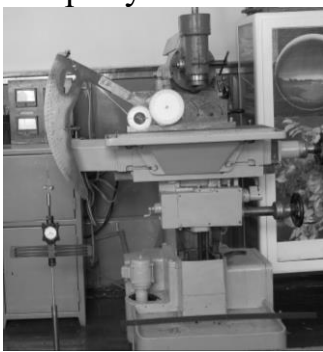
де,  $d_{нл.маx}$  і  $d_{нл.мін}$  – відповідно максимальний і мінімальний діаметри отворів внутрішніх пластин;  $D_{ем.мін}$  – мінімальний діаметр зовнішньої поверхні втулки;  $\beta_\phi$  – кут нахилу фаски;  $\Delta_\phi$  – величина фаски;  $d_{ем.маx}$  максимальний діаметр ВЦП втулки.

У четвертому розділі «Експериментальне дослідження зусилля формування згортних втулок, точності їх форми, шорсткості та ступення зміцнення віброобкочених поверхонь» подана установка, методика та результати експериментальних досліджень зусилля формування згортних втулок, шорсткості та зміцнення поверхні, сформованої вібраційним обкочуванням, імовірнісно-статистичний метод оцінювання точності форми ВЦП згортних втулок за параметром відхилення від круглості –  $EFK$  на основі гармонічного аналізу; методика визначення кратності калібрування згортних втулок на відхилення від круглості і оцінювання даних відхилень за коефіцієнтом наповнення форми.

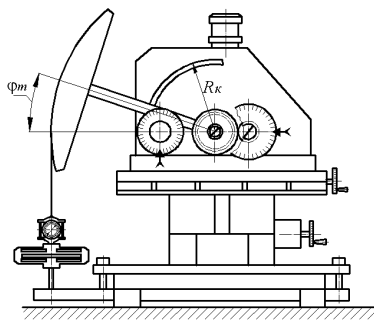
На рис. 14 поданий загальний вигляд експериментальної установки, а на рис. 15 зображені варіанти базування заготовки на технологічній операції – формування згортних втулок.

В результаті оброблення експериментальних даних і використання залежності для визначення зусилля формування  $F_\phi = F_\delta(R_e/R_k)$ , де  $F_\delta$  – зусилля, яке фіксує динамометр;  $R_e$  і  $R_k$  – відповідно радіуси важеля і транспортного каналу, побудовані графіки залежності  $F_\phi$  від кута повороту нижнього торця заготовки  $\phi_m$  і шляху переміщення карточки у формуючій фільері (ФМ), які подані на рис. 16.

Аналіз отриманих графічних залежностей показав, що зі зменшенням радіуса транспортного каналу зусилля формування, а значить і затрачувана робота зменшується. Відзначено, що криві залежності  $F_\phi = f(\phi_m)$  на проміжку  $[0, 2\pi]$  мають екстремуми максимальних значень при однаковому значенні кута  $\phi_m$ .



а)



б)

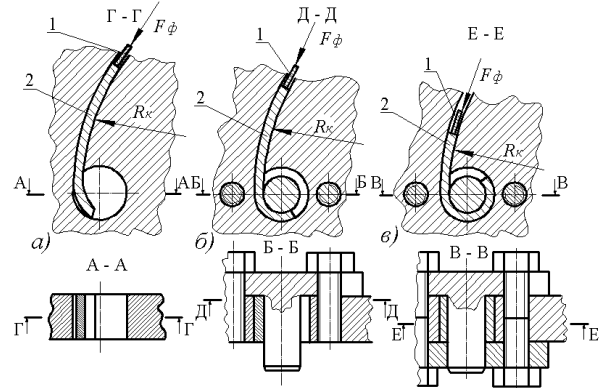


Рис. 14 Загальний вигляд - а) та конструктивна схема - б) установки для визначення зусилля формування

Рис. 15 Варіанти базування заготовки на технологічних операціях: заготовка - 1, шибер - 2

В результаті гармонічного аналізу відхилень від круглості ВЦП ПРВЛ різних виробників отримали експериментальні лінійні спектри амплітуд відхилень від круглості ВЦП втулок для ланцюгів з кроками (мм): 9,525; 12,7; 15,875; 19,05; 25,4 на проміжку  $[0, 2\pi]$ , в зоні стикового шва і в зоні навпроти шва. Це дає можливість визначити кутове положення стикового шва втулок при складанні внутрішніх ланок, щоб в зону контакту з валиком попадала частина ВЦП втулки з мінімальним відхиленням від круглості.

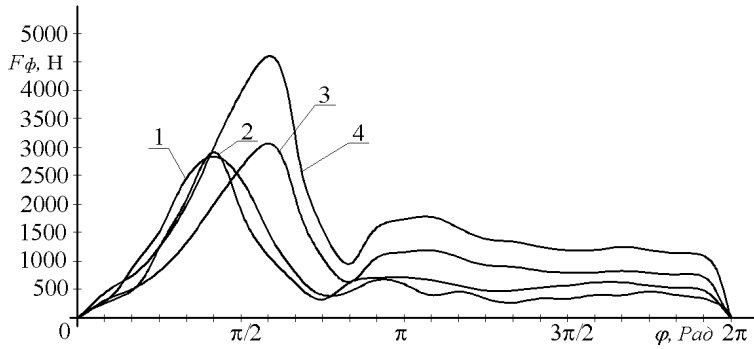


Рис.16. Графіки залежності  $F_\phi$  від кута  $\phi$  при згортанні карточки: 1, 2, 3 – відповідно для  $R = 50, 75, 100$  мм.; 4 – за техн. процесом НЗНА

втулок, виготовлених при  $R=50$  мм за патентом [19, 20].

Використавши гармонічний аналіз і метод ітерацій, отримали значення відхилень від круглості  $E_{FK}$  за усередними круглограмами, які подані у таблиці 1.

Таблиця 1

Значення відхилень від круглості при різних способах базування та радіусах каналу

Вид базування	Радіус транспортного каналу $R$ , мм	Характеристики розсіювання відхилень від круглості		
		Середні значення $E_{FK}$ , мкм	Дисперсія $D(E_{FK})$ , мкм <sup>2</sup>	Максимальне значення $E_{FK_{max}}$ , мкм
ФМ – без оправки	100	254	92420	1338
	50	231	76770	1235
ФМ – оправка консольна	100	99	21680	629
	50	79	3683	330
ФМ – оправка на двох опорах	100	87	20240	589
	50	58	2041	218
На 2-х опорах за тех. проц [19, 20]	50	24	1802	155

Аналіз отриманих значень показав, що найефективніший технологічний процес захищений пат. № 78947. Середні значення відхилень від круглості згортних втулок, сформованих за цим процесом, у порівнянні із середніми значеннями втулок, сформованих на радіусі 50 мм і однаковим базуванням зменшилась у 2,4 рази. Максимальне значення підвищення точності форми за математичним сподіванням параметра  $E_{FK-M}(E_{FK})$ , отриманих за запропонованим технологічним процесом, при якому згортання здійснюється в каналі з  $R=100$  мм при базуванні ФМ без оправки, склало більше 10,6 разів.

Якісними показниками сформованої віброобкочуванням поверхні є її шорсткість та зміцнення. Експериментальне дослідження впливу зусилля обкочування поверхні заготовки кулькою, як моделювання вібраційного обкочування, показало значний вплив зусилля обкочування на зниження шорсткості. Збільшення зусилля обкочування від 0 до 200, 250, 300, 350 Н сформувало наступні значення математичних сподівань середнього арифметичного відхилення профіля  $R_a$  відповідно: 0,69; 0,55; 0,40; 0,28 і 0,24 мкм. За критерієм Стьюдента  $t_k$  встановлено суттєвий вплив збільшення зусилля обкочування на параметр  $R_a$ . Зміцнення поверхні канавки, сформованої вібраційним обкочуванням, оцінювали за

математичними сподіваннями мікротвердості та дисперсії за критеріями Стьюдента і Фішера. Встановлено, що відмінність  $M(H_3)$  і  $M(H_{б.с.})$  за середнім значенням суттєва, а за дисперсією - не суттєва. Ступінь зміцнення в залежності від зусилля обкочування склав  $\Delta H=32,3-64,1\%$ .

Для відхилень від круглості поперечних перерізів циліндричних поверхонь згортних втулок, які описуються нестационарними випадковими функціями, запропоновано методику оцінювання точності форми за коефіцієнтом наповнення профілю, який є адекватною оцінкою його форми і однозначно визначає закономірність зміни площі між прилягаючим колом і функцією відхилень від круглості, суть якого пояснюється рис. 17 і залежністю:

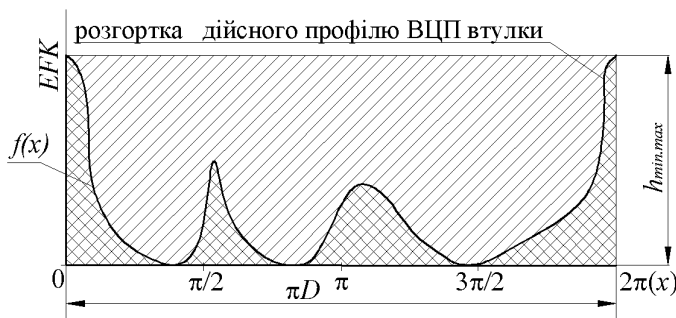


Рис. 17. Схематичне зображення усередненої кривої відхилень від круглості  $h$  (вісь  $ox$  – розгортка прилягаючого кола)

експериментальних досліджень та визначених математичних сподівань і дисперсій, отриманих при заданих кількостях фільтер, з використанням критеріїв Стьюдента і Фішера.

**У п'ятому розділі «Економічна ефективність запропонованого технологічного забезпечення виготовлення згортних втулок підвищеної точності форми і якості на прикладі втулок для ПР 19,05-3800»** подана методика визначення економічної ефективності безпосередньо на виробництві за рахунок удосконалення технологічного процесу і у сфері експлуатації за рахунок підвищення зносостійкості згортних втулок.

У виробництві економічна ефективність при виготовленні згортних втулок ПРВЛ забезпечується за рахунок економії електроенергії, зменшення кількості деформуючих фільтер на річну програму випуску та підвищення ефективності використання основних фондів.

Економічна ефективність у сфері експлуатації ПРВЛ забезпечується підвищенням зносостійкості шарнірів за рахунок забезпечення підвищення точності форми ВЦП згортних втулок і покращення умов експлуатації контактуючих поверхонь шарнірів ПРВЛ.

Отримані залежності для визначення економічної ефективності за кожним із вищеподаних складових. Як приклад подано залежність для визначення економії електроенергії при формуванні однієї втулки  $E_e = \Delta N_{en} \cdot Q_{з.в.пр.} \cdot \Pi_k$ ,

$$\text{де } \Delta N \approx 1 / (102 \cdot t_{н.к.}) \cdot (A_{мп.} - A_{зн.}) = L / (102 \cdot t_{н.к.}) \cdot \left[ \int_0^L f(F_{\phi.мп.}) \cdot dF_{\phi.мп.} - \int_0^L f(F_{\phi.з.}) \cdot dF_{\phi.з.} \right],$$

$$K_{пр.} = \int_0^{\pi D} f(x) \cdot dx \cdot 100\% / \pi \cdot D \cdot h_{\min.\max}, \quad (8)$$

де  $f(x)$  – функція зміни біжучого радіуса – вектора ( $EFK$ );  $D$  – зовнішній діаметр втулки;  $h_{\min.\max}$  – максимальне значення  $EFK$  серед мінімальних відхилень від круглості.

Запропоновано нову методику визначення кратності калібрування за параметром відхилення від круглості ВЦП згортних втулок на основі



– економія електроенергії (кВт/год.) від реалізації запропонованого технічного рішення на одну втулку;  $Q_{з.в.пр.}$  – кількість втулок на програму;  $C_k$  – ціна 1 кВт/год.;  $t_{н.к.}$  – час дії зусилля формування згортної втулки;  $A_{тр.}$  і  $A_{зн.}$  – відповідно значення робіт, виконаних при формуванні втулок за традиційною і запропонованою технологіями;  $f(F_{ф.тр.})$  і  $f(F_{ф.з.})$  – відповідно функції зміни зусиль формування згортних втулок за традиційною і запропонованою технологіями (рис. 16).

В загальному при річній програмі 7,065 млн. шт. втулок у сфері виробництва економічний ефект складе 554,51 тис. грн., а у сфері експлуатації за рахунок збільшення зносостійкості шарнірів ПРВЛ економічний ефект складе 4,75 млн. грн.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі подано нове технічне вирішення науково-технічної задачі, яке полягає у підвищенні якості згортних втулок шляхом технологічного забезпечення підвищеної точності їх форми та якості за показниками: відхилення від круглості; зниження шорсткості і підвищення мікротвердості їх ВЦП, а саме:

1. Отримані залежності для визначення величини відпружинювання заготовки в процесі формування шкворневих згортних втулок, які дають можливість здійснити корекцію профілів деформуючих елементів технологічного спорядження і забезпечити підвищення точності форми втулки при її згортанні.

2. Запропонований технологічний процес згортання втулок ПРВЛ, при якому максимальне зусилля формування в 1,4 рази менше, ніж у традиційному.

3. Запропоновані технологічні процеси формування згортних втулок ПРВЛ і шкворневих згортних втулок, які забезпечують у 2,4-5,6 разів менші відхилення від круглості порівняно з традиційними.

4. Встановлено, що спосіб базування при згортанні втулок має суттєвий вплив на точність форми. Використано за теорією малої вибірки метод ітерацій і отримано характеристики розсіювання відхилень від круглості – математичне сподівання  $M(EFK)$  і дисперсію -  $D(EFK)$ . Відзначено, що найвища точність форми забезпечується запропонованим і запатентованим технологічним процесом, при якому формування втулки здійснюється із наступними параметрами точності:  $M_3(EFK)=23,9$  мкм;  $D(EFK)=1802$  мкм<sup>2</sup> і  $M_{max}(EFK)=155$  мкм. Ефективність запропонованих технологічних рішень підтверджено критеріями Стюдента і Фішера.

5. Встановлено, на основі гармонічного аналізу що дисперсія  $EFK$  ВЦП виготовлених згортних втулок досліджуваних ПРВЛ в зоні стикового шва обмеженої кутом  $\pi/2$  і діаметрально протилежній зоні може бути оцінена за амплітудами перших двох гармонік, так як  $(A_1^2 + A_2^2)/2 = (0,9-0,95) \sum_{i=1}^{10} A_i / 2$ .

6. Встановлено, що при згортанні втулок із заготовки запропонованої у вигляді циліндричної панелі, максимальні зусилля при відповідних радіусах каналів 100, 75 і 50 мм. становлять 3097, 2932 і 2868 Н, що відповідно менше на 33,3; 36,9 і 38,3% від максимального зусилля 4645 Н, що створюються при традиційному технологічному процесі.

7. Використання імовірнісно-статистичного методу оцінювання відхилень від круглості на основі гармонічного аналізу показали, що у зоні розміщеній навпроти

стикового шва ( $3/4\pi$ ,  $3/2\pi$ ) відхилення від круглості мінімальні і у декілька разів менші ніж на проміжку ( $0$ ,  $2\pi$ ).

8. Встановлено, що вібраційне обкочування поверхні заготовок згортних втулок суттєво зміцнює поверхню, яка формуватиме ВЦП втулок. Математичне сподівання мікротвердості зміцненої поверхні шляхом обкочування кулькою із зусиллям: 0; 200; 250; 300 і 350 Н відповідно склало 12,58; 16,65; 18,11; 19,48 і 20,65 (кгс/мм<sup>2</sup>), а ефективність такого технологічного прийому підтверджена критерієм Стьюдента. Мікротвердість від зусиль обкочування 200; 250; 300 і 350 Н збільшилась порівняно із мікротвердістю після прокатки відповідно: 1,32; 1,43; 1,55; 1,64 разів.

9. Встановлено значний вплив зусилля обкочування на шорсткість поверхні сформованої запропонованим методом. Так при зміні зусиль обкочування в межах 0 (після прокатування), 200, 250, 300, 350 Н отримали наступні математичні сподівання параметра шорсткості  $R_a$ , відповідно: 0,60; 0,55; 0,40; 0,28 і 0,24 мкм. Сутєвість зміни або ефективність такого технологічного прийому підтверджено критерієм Стьюдента

10. Розроблено імовірно-статистичний метод визначення зусилля дорнування ВЦП згортних втулок. За істинне значення рекомендовано приймати макимальне  $F_{др.max}$ , яке на 18-24% більше ніж зусилля, визначене за традиційною методикою.

11. Узагальнена й очікуваний річний економічний ефект при програмі випуску 134900 пог. м. ПРВЛ складе: у сфері виробництва 554,51 тис. грн., та у сфері експлуатації за рахунок збільшення зносостійкості шарнірів ПРВЛ 4,75млн. грн. Результати роботи впровадженно у виробництво з річним економічним ефектом 19220 грн. в тому числі на ПП “Кам’янець-Подільська агрегат” – 5370 грн; на ТОВ “БІГМА” м. Тернопіль – 7150 грн, та ТОВ “Кабельний завод” м. Кам’янець-Подільськ – 6700 грн.

## ОСНОВНІ ОПУБЛІКОВАНІ ПРАЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Публікації в закордонних збірниках*

1. Theoretical and Experimental Substantiation of Angle Orientation of Rolling Bushings of Roller and Bushing Chains / P. Kryvyu, P. Kryvynsryu, V. Bodnar, I. Sotnyk, A. Senyk // Paper no. MSEC 2007-31211 International Manufacturing Science and Engineering conference. Oktober 15-1. - Atlanta, Georgia, USA, 2007. - pp. 623-627. (Автором на основі гармонічного аналізу із заданою імовірністю визначено достатню кількість гармонік. Індексуються в міжнародній наукометричній базі SciVerse Scopus).

2. Синтез свертних втулок с раскрытым стыковым швом для приводных роликовых и втулочных цепей / П.Д. Кривый, А.А. Сеньк, В.Р. Кобельнык, П.П. Кривинский // Международный инженерный журнал “Приводы и компоненты машин” ООО НПП “Подъемтранссервис”. – Москва, 2016. - №1-2 (19). – С.12-17. (Автором на основі теорії розмірних ланцюгів досліджено допустимі макимальні і мінімальні значення величини розкриття стикових швів втулок, на торцевих поверхнях яких виконані фаски).

### **Публікації у фахових виданнях України**

3. Кривий П.Д. Технологічне спорядження для формування згортних втулок / П.Д. Кривий, А.А. Сенік // Вісник ТДТУ. – Тернопіль, 2003. – Том 8. – №2. – С. 29-34. *(Автором запропоновано різні варіанти механізмів повороту деформуючих фільтер в процесі калібрування згортної втулки).*

4. Кривий П.Д. Приведена сила тертя і величина відпружинення при переміщенні прямокутної карточки в криволінійному каналі / П.Д. Кривий, В.Р. Кобельник, А.А. Сенік // Міжвузівський збірник “Наукові нотатки” ЛДТУ. – Луцьк, 2005. – №17. – С. 192-198. *(Автором запропонована геометрична модель транспортування плоскої карточки у криволінійному радіусному каналі і залежності для визначення сили тертя).*

5. Кривий П. Методика експериментального дослідження зусилля формування згортних втулок / П. Кривий, А. Сенік // Вісник ТДТУ. – Тернопіль, 2007. – Том 12. – №1. – С. 53-59. *(Автором запропонована і реалізована методики фіксації значень динамометра та обробки експериментальних даних на ПК).*

6. Згортна втулка для приводних роликів і втулкових ланцюгів / О.Л. Бондаренко, В.Р. Кобельник, П.Д. Кривий, П.П. Кривінський, А.А. Сенік // Збірник наукових праць “Процеси механічної обробки в машинобудуванні” ЖДТУ. – Житомир, 2009. – Вип. 6. – С. 68-81. *(Автором запропоновано профіль стикового шва і методика визначення імовірності попадання в контакт з валиком певної довжини цього шва).*

7. Формування на плоских поверхнях віброобкочуванням регулярного мікрорельєфа з підвищеним ступенем перекриття / П.Д. Кривий, Н.П. Кашуба, А.А. Сенік, П.П. Кривінський // Збірник наукових праць “Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем” ДДМА. – Краматорськ, 2011. – Вип. №29. – С.138-145. *(Автором теоретично досліджено вплив елементів режиму вібраційного обкочування на відносну площу віброобкочування).*

8. Сенік А.А. Конструкторсько-технологічне забезпечення підвищення точності форми згортних втулок / Сенік А.А. // Збірник наукових праць “Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем” ДДМА. – Краматорськ, 2017. – Вип. № 41. – С. 46 - 55.

### **Тези конференцій та семінари**

9. Кривий П.Д. Технологическое обеспечение точности формы свертных втулок приводных роликовых и втулочных цепей / П.Д. Кривий, П.П. Кривий, А.А. Сенік // Матеріали міжнародної ювілейної науково-практ. конф. “Учебная, научно-практическая и инновационная деятельность высшей школы в современных условиях”. Направление научно-производственная и инновационная деятельность высшей школы в современных условиях: тезисы док. – Оренбург: ОГУ, 2001. – С. 218-219. *(Автором запропоновано корекцію робочих профілів деформуючих інструментів, що забезпечує підвищення точності форми).*

10. Кривий П. Новый метод контролю відхилень від круглості згортних втулок / П. Кривий, А. Сенік, В. Лазарюк // Матеріали VI наук. конф. Терноп. держ. техн. універ. ім. Івана Пулюя: 24-26 квітня 2002: тези доп. – Тернопіль: ТДТУ, 2002 – С. 46. *(Автором запропоновано для контролю значних відхилень від круглості*

застосувати відомий метод проектування, використавши ПК).

11. Кривий П.Д. Вплив кратності калібрування на відхилення від круглості згортних втулок / П.Д. Кривий, Є.І. Горлій, А.А. Сенік // Тези доп. на 6-му Міжнар. симпозіумі укр. інженерів-механіків у Львові: 21-23 травня 2003: тези доп. – Львів: КІНПАРІ ЛТД, 2003 – С.103. *(Автором запропоновано використати для обґрунтування кількості фільтер і оцінки ефективності калібрування середні значення відхилень від круглості та дисперсії за критеріями Стьюдента і Фішера).*

12. Статистична оцінка на основі гармонічного аналізу впливу технології формування циліндричних поверхонь на відхилення їх від круглості / П. Кривий, А. Сенік, В. Коломієць, Н. Тимошенко, П. Кривінський // Збірник тез доп. Міжнар. наук.-тех. конф. молодих учених та студентів “Актуальні задачі сучасних технологій”: 21 – 22 грудня 2010 р.: тези доп. – Тернопіль: ТНТУ, 2010. – С. 53. *(Автором запропоновано використання критерію  $\lambda_0$  для перевірки гіпотези миттєвого розсіювання і відсутності систематичних похибок).*

13. Сенік А.А. Статистичне оцінювання відхилень від круглості згортних шкворневих втулок автомобілів / А.А. Сенік // Матеріали міжнар. наук.-тех. конф. молодих учених та студентів “Актуальні задачі сучасних технологій”: 11 – 12 грудня 2013 р.: тези доп. – Тернопіль: ТНТУ, 2013. – С. 136. *(Автором робота виконана одноосібно в якій, запропоновано оцінювати відхилення від круглості на секторі, що обмежений центральним кутом  $\pi/2$  у 12 положеннях та отримані середні значення цього параметра прийняти як випадкові величини).*

14. Нова технологія виготовлення згортних втулок приводних роликів ланцюгів на основі імовірнісного підходу / П.Д. Кривий, А.А. Сенік, Н.М. Тимошенко, О.І. Яловий // Матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. «Обладнання і технології сучасного машинобудування»: 11-12 травня 2017р.: тези доп. – Тернопіль: ТНТУ, 2017. – С. 92-93. *(Автором запропоновано технологічний процес виготовлення корсетної втулки з врахуванням величини бочкоподібності запресованих у пластини внутрішніх ланок втулок).*

15. До питання точності форми згортних втулок за параметром відхилення від круглості / П.Д. Кривий, В.О. Дзюра, Н.М. Тимошенко, А.А. Сенік // Збірник тез доповідей 8-мої Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування»: 28 – 29 вересня 2017 р.: тези доп. – Херсонська державна морська академія, 2017. – С. 434 – 435. *(Автором для оцінки відхилень від круглості запропонований новий параметр – коефіцієнт наповнення профілю).*

16. Сенік А. Економічна ефективність прогресивного технологічного процесу виготовлення згортних втулок для приводних роликів втулкових ланцюгів / А. Сенік // Матеріали Міжнар. наук.-тех. конф. “Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій” присвяченої 100-річчю з дня заснування НАН України та на вшанування пам’яті І. Пулюя (100 річчя з дня смерті): 22 – 24 травня 2018р.: тези доп. – Тернопіль: ТНТУ, 2018. – С. 159-160.

### **Патенти України**

17. Дек. Пат. 55106А Україна, МПК В21D 05/10. Пристрій для формування згортних втулок / Кривий П.Д., Сенік А.А.; заявник і патентоотримувач ТДТУ ім. І.

Пулюя. – № 2002 075349; заявл. 01.07.2002; опубл. 17.03.2003, Бюл. № 3. (*Частка всіх авторів однакова*).

18. Пат. 81025 Україна, МПК В24В 39/00 (2013.01). Пристрій для обробки плоских поверхонь віброобточуванням / Кривий П.Д., Кашуба Н.П., Сенник А.А., Кривінський П.П.; заявник і патентотримувач Кривий П.Д., Кашуба Н.П., Сенник А.А., Кривінський П.П. – № а2012 13722; заявл. 30.11.2012; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. (*Частка всіх авторів однакова*).

19. Пат. 78307 Україна, МПК В21D 5/00 (2013.01). Спосіб виготовлення згортної втулки / Сенник А.А., Кривий П.Д., Кобельник В.Р., Бондаренко О.Л., Кривінський П.П.; заявник і патентотримувач ТНТУ ім. І. Пулюя. – № U2012 11625; заявл. 08.10.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5. (*Частка всіх авторів однакова*).

20. Пат. 78947 Україна, МПК В21J 1/02 (2006.01). Заготовка для згортної втулки / Кривий П.Д., Сенник А.А., Бондаренко О.Л., Кривінський П.П.; заявник і патентотримувач Кривий П.Д., Сенник А.А., Бондаренко О.Л., Кривінський П.П. – № U2012 09702; заявл. 10.08.2012; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 7. (*Частка всіх авторів однакова*).

21. Пат. 90980 Україна, МПК В21D 5/10 (2006.01). Пристрій для виготовлення згортних втулок із листових заготовок / Бондаренко О.Л., Кривінський П.П.; Кривий П.Д., Сенник А.А., Шпак Р.І.; заявник і патентотримувач Бондаренко О.Л., Кривінський П.П.; Кривий П.Д., Сенник А.А., Шпак Р.І. – № U2014 02250; заявл. 05.03.2014; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11. (*Частка всіх авторів однакова*).

22. Пат. 92285 Україна, МПК В21J 1/00 (2014.01). Заготовка для згортної втулки / Кривий П.Д., Сенник А.А., Кривінський П.П., Бондаренко О.Л.; заявник і патентотримувач Кривий П.Д., Сенник А.А., Кривінський П.П., Бондаренко О.Л. - №u2014 02253; заявл. 05.03.14; опубл. 11.08.14, Бюл. №15. (*Частка всіх авторів однакова*).

23. Пат. 92908 Україна, МПК В21L 19/00 (2014.01). Згортна втулка / Сенник А.А., Кривий П.Д., Кобельник В.Р., Кривінський П.П., Бондаренко О.Л.; заявник і патентотримувач Сенник А.А., Кривий П.Д., Кобельник В.Р., Кривінський П.П., Бондаренко О.Л. - №u2014 03385; заявл. 02.04.14; опубл. 10.09.14, Бюл. №17. (*Частка всіх авторів однакова*).

24. Пат. 112745 Україна, МПК (2016.01) В21J 1/00 F16G 13/18 (2006.01). Згортна втулка / Сенник А.А.; заявник і патентотримувач ТНТУ ім. І. Пулюя. – № U2016 07262; заявл. 04.07.2016; опубл. 26.12.2016, Бюл. № 24.

25. Пат. 115787 Україна, МПК В29С 47/12 (2006.01). Розрізна пружна фільєра для калібрування згортних втулок / Сенник А.А.; заявник і патентотримувач ТНТУ ім. І. Пулюя. – № U2016 11727; заявл. 21.11.2016; опубл. 25.04.2017, Бюл. № 8.

26. Пат. 116144 Україна, МПК В29С 47/12 (2006.01). Розрізна пружна фільєра для калібрування згортних втулок з п-вершинним огранюванням / Кривий П.Д., Сенник А.А., Тимошенко Н.М.; заявник і патентотримувач ТНТУ ім. І. Пулюя. – № U2016 11723; заявл. 21.11.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9. (*Частка всіх авторів однакова*).

## АНОТАЦІЯ

*Сеник А.А.* Технологічне забезпечення виготовлення згортних втулок підвищеної точності форми і якості. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 «Технологія машинобудування». – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2018.

Дисертація присвячена теоретичним і експериментальним дослідженням технологічного процесу виготовлення згортних втулок підвищеної якості.

У роботі теоретично досліджено зміну форми втулки в процесі її формування; силові характеристики при згортанні втулки; відносну площу регулярного мікрорельєфу з підвищеним ступенем перекриття і в імовірнісному аспекті - зусилля дорнування внутрішніх циліндричних поверхонь (ВЦП) цих втулок.

Розроблено нові конструкції заготовок згортних втулок і технологічного спорядження для їх формування.

На основі використання імовірнісно-статистичного методу експериментально досліджено вплив кривини транспортного каналу та форми заготовок втулок на точність форми ВЦП втулок.

Експериментально досліджено закономірності зміни зусилля формування згортних втулок при транспортуванні заготовок у транспортних каналах різної кривизни, а також вплив зусилля обкочування кулькою поверхні заготовки для зниження шорсткості і підвищення ступеня зміцнення.

**Ключові слова:** згортна втулка, величина відпружинювання, точність форми, шорсткість, ступінь зміцнення.

## АННОТАЦИЯ

*Сеник А.А.* Технологическое обеспечение изготовления свертных втулок повышенной точности формы и качества. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 «Технология машиностроения». - Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2018.

Диссертация посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию технологического процесса изготовления свертных втулок повышенного качества.

В работе теоретически исследовано изменение формы втулки в процессе ее формирования; силовые характеристики при свертывании втулки; относительную площадь регулярного микрорельефа с повышенной степенью перекрытия и в вероятностном аспекте - усилия дорнования внутренних цилиндрических поверхностей (ВЦП) этих втулок.

Разработаны новые конструкции заготовок свертных втулок и технологической оснастки для их формирования.

На основе использования вероятностно-статистического метода экспериментально исследовано влияние кривизны транспортного канала и формы заготовок втулок на точность формы ВЦП втулок.

Экспериментально исследованы закономерности изменения усилия формирования свертных втулок при транспортировке заготовок транспортными каналами различной кривизны, а также влияние усилия обкатывания шариком поверхности заготовки на снижение шероховатости и повышения степени укрепления.

**Ключевые слова:** свертная втулка, величина отпружинивания, точность формы, шероховатость, степень упрочнения.

#### ANNOTATION

*Senyk A.A.* Technological equipment for producing turning bushes of advanced shape and quality – Qualification scientific manuscript.

Dissertation is submitted for the scientific degree of “Candidate of Sciences” (Engineering) in specialism 05.02.08 «Mechanical Engineering». – Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, 2018.

The dissertation is devoted to the theoretical and experimental investigations of the manufacturing process for producing turning bushes of the advanced quality according to such criteria: accuracy of the internal cylinder surface (ICS) shape due to the deflection parameter from the *EFK* rounding; decrease of the surface roughness, caused by its vibration rolling by the ball, increasing its micro-hardness and the level of strengthening.

Basing on the review and analysis of the available manufacturing processes for producing turning bushes and technological equipment, some shortcomings and unknown problems have been revealed, basing on which the areas of investigations for obtaining the goal have been determined.

The values of springing while shaping of turning bushes in the semi-cylinder matrix have been investigated theoretically, as well as their movement in the transporting channel. Their application will make it possible to correct the profiles of deforming elements (punches) of the technological equipment, which will contribute to the increase of the shape precision.

The probability-statistic method and the harmony analysis, basing on the trigonometric Fourier’s series, have been used to estimate the deflections at the ICS rounding of turning bushed, formed at different values of the transporting channel curvature. It was determined, that the proposed manufacturing process after the bush being turned, provides sufficient decrease of curvature deflection, as compared with that, being formed during the conventional manufacturing process, in 2,4-5,6 times.

It was determined, that the maximum forming force in the proposed manufacturing process is in 1,4 times lower than that in the conventional one.

It was stressed, that the increase of the rolling force of the blank surface by the ball from 0 till 200; 250; 300 and 350 N correspondingly provides such values of the mathematic expectations of the average mathematic deflection of the profile  $R_a$ : 0,69; 0,55; 0,40; 0,28 and 0,24 mkm.

Mathematic expectations by the ball rolling of its surface with the forces 0; 200; 250; 300 and 350 N correspondingly were 12,58; 16,65; 18,11; 19,65 (kgs/mm<sup>2</sup>), and the efficiency of this manufacturing process is proved by the Student’s criterion.

**Key words:** turning bush, springing value, shape accuracy, roughness, level of strengthening.