

ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЗМІЦНЕННЯ ГВИНТОВИХ ПОВЕРХОНЬ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ДЕФОРМУЮЧИМИ ПУАНСОНАМИ

О.Л. Ляшук, А.Є. Дячун, В.М. Клендій, О.Л. Третьяков

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя;
м. Тернопіль, вул. Руська, 56, e-mail: Oleglaskhuk@ukr.net

Представлено конструкцію та проведено теоретичні дослідження, які підтверджують переваги використання для зміцнення гвинтових робочих органів деталей поверхневого пластичного деформування за допомогою обкатного інструменту.

Розглянуто питання технологічного методу забезпечення надійності гвинтових поверхонь робочих органів. Досліджено силові параметри та граничні геометричні фактори процесу зміцнення гвинтових поверхонь робочих органів. Виведено аналітичні залежності, які дають можливість встановлювати силові параметри процесу поверхневого зміцнення.

На основі нерівностей побудовано графічні залежності максимально допустимого значення перекриття гвинтової поверхні робочого органу та деформуючого пуансона від геометричних параметрів процесу. Встановлено, що збільшення перекриття гвинтової поверхні робочого органу та деформуючого пуансона призводить до зростання силових параметрів.

Ключові слова: робочий орган, гвинтова поверхня, зміцнення, деформуючий пуансон.

Представлены конструкции и проведены теоретические исследования, подтверждающие преимущества использования для укрепления винтовых рабочих органов деталей поверхностного пластического деформирования с помощью обкаточного инструмента.

Рассмотрены вопросы технологического метода обеспечения надежности винтовых поверхностей рабочих органов. Исследованы силовые параметры и предельные геометрические факторы процесса укрепления винтовых поверхностей рабочих органов. Выведены аналитические зависимости, позволяющие устанавливать силовые параметры процесса поверхностного упрочнения.

На основании неравенств построены графические зависимости максимально допустимого значения перекрытия винтовой поверхности рабочего органа и деформирующего пуансона от геометрических параметров процесса. Установлено, что увеличение перекрытия винтовой поверхности рабочего органа и деформирующего пуансона приводит к росту силовых параметров.

Ключевые слова: рабочий орган, винтовая поверхность, укрепления, деформирующий пуансон.

The design is described and theoretical research is conducted, confirming the advantages of using rolling tool for strengthening the helical operating devices of the surface plastic deformation.

The technological method for ensuring the reliability of the helical surfaces of the operating devices is considered. The force parameters and maximum permissible geometrical factors of the process of strengthening the helical surfaces of the operating devices are studied. Analytical dependencies are derived that allow to establish the force parameters of the surface strengthening process.

On the basis of unevenness, graphical dependencies of the maximum permissible value of the overlap of the helical surface of the operating device and the deforming punch on the geometric parameters of the process are constructed. It is established that with an increase in the overlap of the helical surface of the operating device and the deforming punch, the force parameters increase.

Key words: operating device, helical surface, strengthening, deforming punch.

Вступ. Гвинтові поверхні є робочими для великої частини деталей, що виготовляються в умовах машинобудівних виробництв. Робочі поверхні зазнають великих навантажень, тому в технологічних процесах виготовлення таких деталей необхідно використовувати процеси поверхневого зміцнення.

Будь-яку деталь, яка обмежує надійність і довговічність всієї конструкції й працює в умовах високих напружень з врахуванням характеру навантаження, робочих температур, навколишнього середовища, можна розглядати як важконавантаженою. Деталі з гвинтовими профілями відносяться саме до таких. У сучасних транспортних машинах гвинтові деталі є основними робочими органами. Кожна така деталь може мати декілька ділянок можливих пошкоджень. Тому ймовірність її відмови пропорцій-

на числу таких зон важконавантажених деталей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Перспективність використання поверхневого пластичного деформування (ППД) для підвищення контактної витривалості в порівнянні з іншими методами зміцнення поверхні полягає в тому, що ППД дозволяє отримати: зміцнений поверхневий шар до 10 мм; збільшення мікротвердості відносно початкової складає в середньому близько 120%; забезпечується плавний перехід між зміцненим поверхневим шаром і серцевиною. Обробними способами ППД може бути забезпечена мала шорсткість зміцненої поверхні [3]. Весь спектр відомих методів зміцнення пластичним деформуванням ретельно досліджуються як закордонними, так і україн-

ськими науковцями [7, 8]. Цікавим для зміцнення поверхневих шарів деталей машин є метод статико-імпульсної обробки, розроблений і запатентований авторами А.В. Кірічком, Д.Л. Соловйовим та А.Г. Лизуткіним [4–6]. Встановлено взаємозв'язок між конструктивними, конструктивно-технологічними і технологічними параметрами та їх вплив на показники якості поверхневого шару [7–9]. Проте у розглянутих працях не досліджено силові параметри процесу зміцнення гвинтових поверхонь робочих органів деформуєчими пуансонами.

Метою роботи є дослідження силових параметрів процесу зміцнення у формуванні якості робочих поверхонь деталей типу тіл обертання для підвищення ресурсу їх експлуатації.

Результати досліджень. Для зміцнення широко застосовується пластичне зміцнення шляхом (ППД), унаслідок якого підвищуються твердість, міцність, опір на відрив та утомна міцність поверхневого шару. Поверхнєве зміцнення завдяки стабільним залишковим напруженням стискування, наклепу та сприятливому мікропрофілю поверхні підвищує витривалість деталей порівняно з механічно обробленими у 2 – 2,5 рази і більше, частково або повністю знижує шкідливий для витривалості деталей вплив конструктивних концентраторів напружень, покриттів і корозійних середовищ.

При холодному зміцнюванні металевих поверхонь неоднорідний напружено-деформований стан заготовок супроводжується виникненням залишкових напружень, які негативно впливають на якість поверхонь заготовок, їх механічні властивості. Відомо, що залишкові напруження суттєво впливають на процес старіння прогартованих заготовок з вуглецевих сталей та на межу плинності такого металу [1]. У процесі зміцнення товстостінної заготовки периферійні частини її зміцнюються, а в центральній частині присутній ідеально пластичний шар, що відповідає площині плинності на діаграмі $\sigma_1 = \sigma_i(\epsilon_i)$ [2].

Згідно з викладеними твердженнями запропоновано обкатний інструмент для зміцнення гвинтових поверхонь робочих органів (рис. 1), який виконано у вигляді диска 1, встановленого на осі 2 з можливістю кругового повертання. На периферії поверхні диска рівномірно по колу виконані циліндричні отвори 3 з певним кроком. В радіальних отворах 3 із можливістю осевого переміщення встановлено деформуєчі пуансони 4, кінці яких виконані плоскими 5, загартовані і перебувають у взаємодії з зовнішнім торцевим контуром гвинтового робочого органу 6. Крім цього, центральний отвір 7 диска 1 заповнений під тиском мастилом 8.

Співвісно до зовнішньої поверхні диска 1 жорстко встановлено пружне кільце 9 з відкритою зоною 10. Кінець зони виконано з радіальним виступом 11 для створення додаткового тиску на деформуєчі пуансони 4, а кінець відкритої зони виконано з загостренням 12 для

плавного заходження формувальних пуансонів 4. Крім цього, з протилежного боку від зони зміцнення зовнішньої поверхні гвинтовий робочий орган 6 взаємодіє з опорним роликком 13 довжиною 3-5 витків шнека. Ця взаємодія не порушується при обертанні і вигладжуванні. Гвинтовий робочий орган 6 з обох кінців встановлено в центри 14 з підставкою знизу 15 для забезпечення надійності технологічного зміцнення.

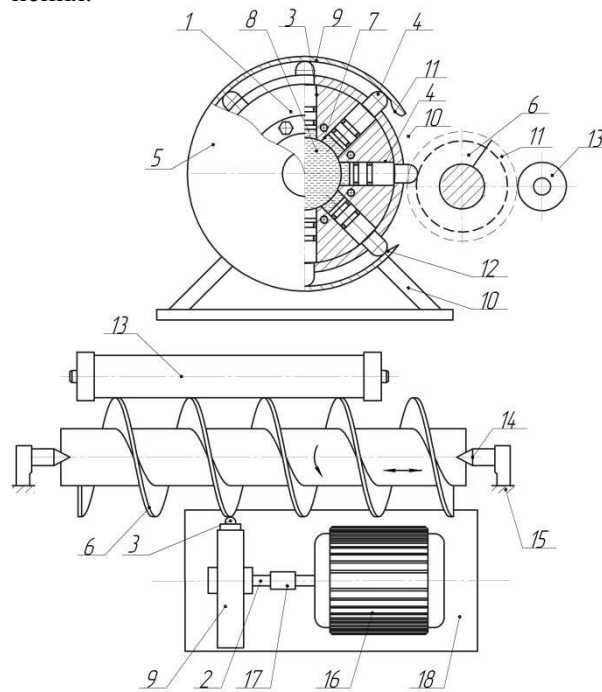
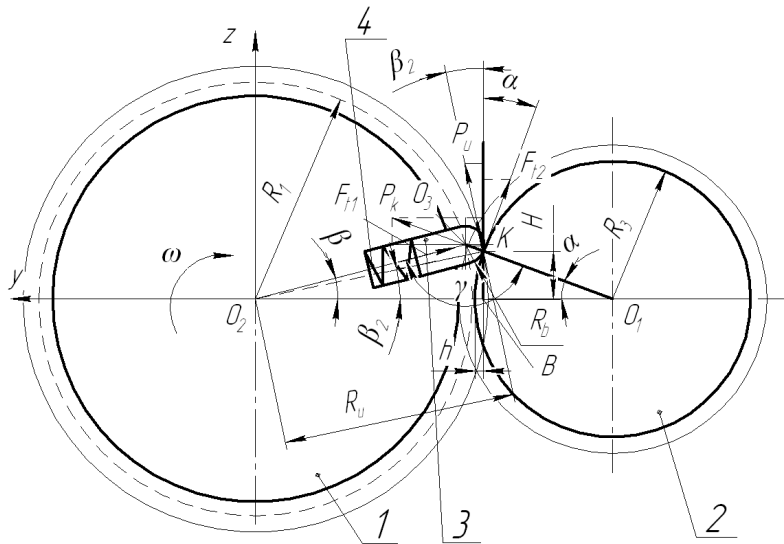


Рисунок 1 – Конструктивна схема інструменту для зміцнення гвинтових поверхонь робочих органів [12]

Обкатний інструмент обертається з високою швидкістю. Робоча частина деформуєчих елементів під час оброблення наносить численні удари, пластично деформуєчи оброблювану поверхню, після чого і миттєво відскакує від неї. Крім удару деформуєчі елементи за час контактування здійснюють вигладжування оброблюваної поверхні.

Для визначення зовнішніх силових параметрів та граничних геометричних факторів процесу зміцнення поверхонь гвинтових робочих органів розглянемо розрахункову схему на рис. 2. При обертанні диска 1 разом із деформуєчим пуансоном 3 за годинниковою стрілкою відбувається зіткнення останнього із гвинтовим робочим органом 2, внаслідок чого відбувається пружно-пластична деформація поверхневого шару гвинтового робочого органу і, як наслідок, його зміцнення. Забезпечення контакту деформуєчого пуансона 3 з гвинтовим робочим органом здійснюється за допомогою пружини стиску 4.

Величина перекриття гвинтового робочого органу та деформуєчого пуансона значною мірою впливає на характер протікання процесу і яким можливо регулювати в процесі зміцнення згідно з розрахунковою схемою на рис. 2 визначаємо за формулою:



1 – диск, 2 – гвинтовий робочий орган, 3 – деформуючий пуансон, 4 – пружина
Рисунок 2 – Розрахункова схема процесу зміцнення поверхонь гвинтових поверхонь робочих органів деформуючим пуансоном

$$h = R_3(1 - \cos \alpha), \quad (1)$$

де R_3 – радіус гвинтового робочого органу, по якому проходить зміцнення поверхні, м;

α – кут контакту деформуючого пуансона із гвинтовим робочим органом з боку гвинтового робочого органу, град.

Із рівняння (1) знаходимо кут контакту деформуючого пуансона із гвинтовим робочим органом:

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{h}{R_3}\right). \quad (2)$$

За теоремою синусів із трикутника $O_1O_2O_3$ одержуємо співвідношення:

$$\frac{R_1}{\sin \alpha} = \frac{R_3 + R_b}{\sin \beta}, \quad (3)$$

де R_1 – радіус розміщення центра сферичної поверхні деформуючого пуансона відносно центра обертання диска 1 в момент зіткнення із гвинтовим робочим органом, м;

R_b – радіус сферичної поверхні деформуючого пуансона, м;

β – кут повороту диска при взаємодії деформуючого пуансона із гвинтовим робочим органом, град.

Із рівняння (3) знаходимо:

$$\sin \beta = \frac{(R_3 + R_b) \sin \alpha}{R_1}. \quad (4)$$

Силу удару P_u в точці контактування K , що спрямована по дотичній до кола ударної взаємодії радіусом R_u із центром в точці O_2 розкладаємо на вектори в напрямку осей y та z :

$$P_{uz} = P_u \cos \beta_2; \quad P_{uy} = P_u \sin \beta_2, \quad (5)$$

де β_2 – кут контакту деформуючого пуансона із гвинтовим робочим органом із боку диска, град.

Знаходимо кут контакту деформуючого пуансона із гвинтовим робочим органом з боку диска із трикутників O_1BK та O_2BK :

$$\frac{H}{R_3} = \sin \alpha; \quad (6)$$

$$\frac{H}{R_u} = \sin \beta_2. \quad (7)$$

Прирівнюючи рівняння (6) та (7), одержимо:

$$\sin \beta_2 = \frac{R_3 \sin \alpha}{R_u}. \quad (8)$$

Радіус кола ударної взаємодії знаходимо за теоремою косинусів із трикутника O_1O_3K :

$$R_u = \sqrt{R_1^2 + R_b^2 - 2R_1R_b \cos \gamma}. \quad (9)$$

Кут між радіусами взаємодії гвинтового робочого органу та деформуючого пуансона γ визначаємо за формулою:

$$\gamma = 180 - (\alpha + \beta). \quad (10)$$

Враховуючи рівняння (2) та (4), одержимо:

$$\gamma = 180 - \left(\arccos\left(1 - \frac{h}{R_3}\right) + \arcsin\left(\frac{(R_3 + R_b) \sin \alpha}{R_1}\right) \right). \quad (11)$$

Тоді радіус кола ударної взаємодії із рівняння (9), враховуючи рівняння (11), знаходимо за виразом:

$$R_u = \left\{ R_1^2 + R_b^2 - 2R_1R_b \cos \left(180 - \left(\arccos\left(1 - \frac{h}{R_3}\right) + \arcsin\left(\frac{(R_3 + R_b) \sqrt{1 - \left(1 - \frac{h}{R_3}\right)^2}}{R_1}\right) \right) \right) \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (12)$$

При цьому кут контактування деформуючого пуансона із гвинтовим робочим органом із боку диска дорівнює:

$$\beta_2 = \arcsin \left\{ \left(R_3 \sqrt{1 - \left(1 - \frac{h}{R_3} \right)^2} \right) \times \left[R_1^2 + R_b^2 - 2R_1R_b \cos \left(180 - \left(\arccos \left(1 - \frac{h}{R_3} \right) \right) \right) \right] + \arcsin \left[\frac{\left(R_3 + R_b \right) \sqrt{1 - \left(1 - \frac{h}{R_3} \right)^2}}{R_1} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

Силу контактування P_k між деформуючим пуансоном та гвинтовим робочим органом, що проходить в напрямку між центрами гвинтового робочого органу O_2 та сферичної поверхні деформуючого пуансона O_3 , також розкладаємо на вектори в напрямку осей y та z :

$$P_{kz} = P_k \sin \alpha; \quad P_{ky} = P_k \cos \alpha. \quad (14)$$

Сила контактування P_k між деформуючим пуансоном та гвинтовим робочим органом залежить від жорсткості пружини та її поперечної деформації, коефіцієнта тертя між деформуючим пуансоном та диском, частоти обертання диска та маси деформуючого пуансона. За розрахунковою схемою (рис. 2) встановлюємо співвідношення:

$$\frac{k_{51}(\delta + h) + F_{t1} + m_5 R_4 \omega^2}{P_k} = \cos(\alpha + \beta), \quad (15)$$

де k_{51} – жорсткість пружини, Н/м;
 δ – попередня деформація пружини, м;
 F_{t1} – сила тертя між деформуючим пуансоном та диском, Н;
 m_5 – маса деформуючого пуансона, кг;
 R_4 – радіус розміщення центра ваги деформуючого пуансона відносно центра обертання диска, м;
 ω – частота обертання диска, рад/с.

Силу тертя між деформуючим пуансоном та диском визначаємо за формулою:

$$F_{t1} = P_k \sin(\alpha + \beta) \mu_1, \quad (16)$$

де μ_1 – коефіцієнт тертя між поверхнями деформуючого пуансона та диска.

Із рівняння (15), враховуючи рівняння (16), знаходимо:

$$P_k = \frac{k_{51}(\delta + h) + P_k \sin(\alpha + \beta) \mu_1 + m_5 R_4 \omega^2}{\cos(\alpha + \beta)}, \quad (17)$$

звідки

$$P_k = \frac{k_{51}(\delta + h) + m_5 R_4 \omega^2}{\cos(\alpha + \beta)} + P_k \operatorname{tg}(\alpha + \beta) \mu_1; \quad (18)$$

$$P_k = \frac{k_{51}(\delta + h) + m_5 R_4 \omega^2}{(1 - \operatorname{tg}(\alpha + \beta) \mu_1) \cos(\alpha + \beta)}. \quad (19)$$

Із рівняння (19), а також на основі експериментальних досліджень встановлено, що при певних значеннях перекриття гвинтового робо-

чого органу та деформуючого пуансона h процес зміцнення припиняється та спрацьовує запобіжна муфта, запобігаючи перевантаженню елементів зміцнюючого механізму. Знайдемо допустимі умови для протікання процесу зміцнення із рівняння (19).

Очевидно, що сила контактування P_k між деформуючим пуансоном та гвинтовим робочим органом повинна бути більшою за нуль, тому, прирівнюючи рівняння (19) до нуля та аналізуючи змінні, встановлюємо, що:

$$\begin{aligned} 1 - \operatorname{tg}(\alpha + \beta) \mu_1 &> 0, \\ \alpha + \beta &< 90. \end{aligned} \quad (20)$$

Тоді

$$\mu_1 < \frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha + \beta)}. \quad (21)$$

Звідки допустимий кут контакту деформуючого пуансона із гвинтовим робочим органом з боку гвинтового робочого органу:

$$\alpha < -\beta + \arctg\left(\frac{1}{\mu_1}\right). \quad (22)$$

Підставляючи рівняння (2) та (4) у нерівність (22), одержуємо:

$$\arccos(1 - k_1) < -\arcsin\left(\frac{(R_3 + R_b) \sqrt{1 - (1 - k_1)^2}}{R_1}\right) + \arctg\left(\frac{1}{\mu_1}\right), \quad (23)$$

де $k_1 = \frac{h}{R_3}$ – співвідношення перекриття гвинтового робочого органу та деформуючого пуансона і радіуса гвинтового робочого органу, по якому проходить зміцнення поверхні.

Після розв'язання нерівності (23), встановлюємо

$$k_1 < -\cos\left[-\arctg\left(\frac{R_3 + R_b}{\mu_1 \left(\frac{\sqrt{\mu_1^2 + 1}}{R_1} + R_3 + R_b\right)}\right)\right] + \arctg\left(\frac{1}{\mu_1}\right) + 1. \quad (24)$$

При цьому за нерівністю (25) визначаємо:

$$h < R_3 \left[\cos\left[-\arctg\left(\frac{R_3 + R_b}{\mu_1 \left(\frac{\sqrt{\mu_1^2 + 1}}{R_1} + R_3 + R_b\right)}\right)\right] + \arctg\left(\frac{1}{\mu_1}\right) + 1 \right]. \quad (25)$$

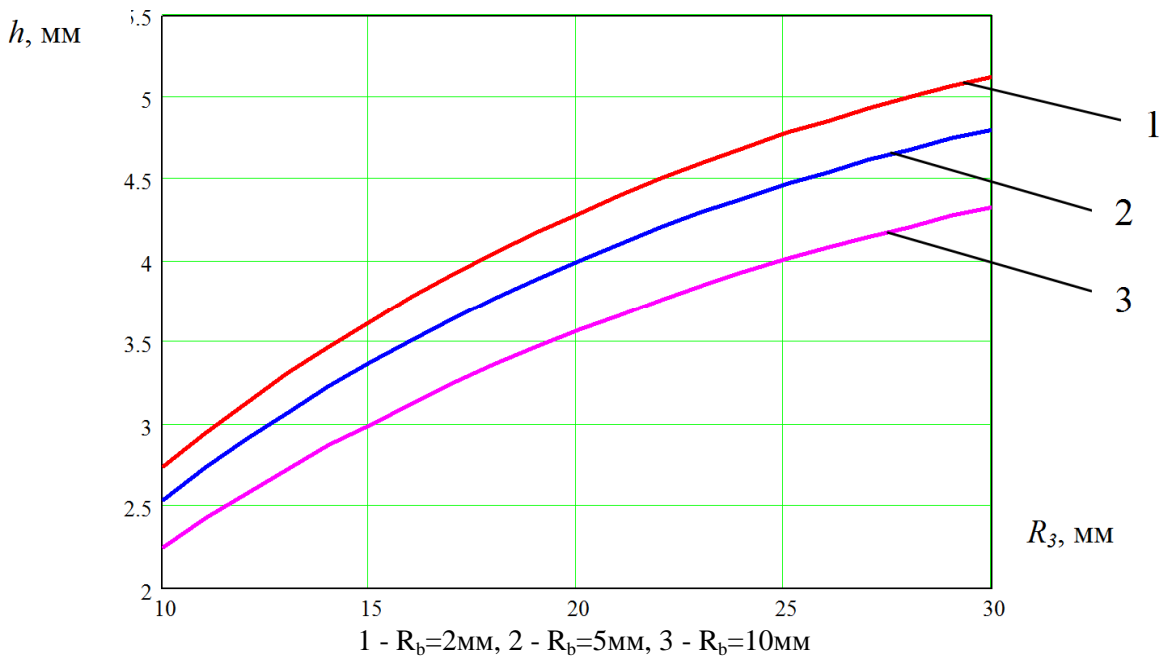


Рисунок 3 – Графіки залежності максимально допустимого значення перекриття гвинтового робочого органу та деформуючого пуансона від радіусу гвинтового робочого органу, по якому проходить зміцнення поверхні $\mu_1=0,8$, $R_1=60$ мм

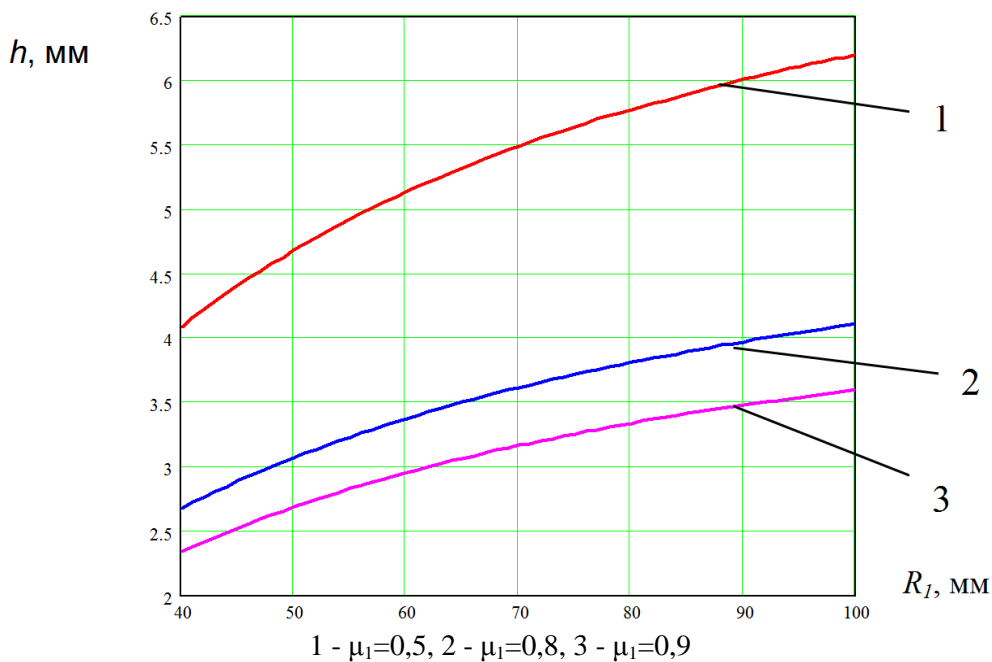


Рисунок 4 – Графіки залежності максимально допустимого значення перекриття гвинтового робочого органу та деформуючого пуансона від радіуса розміщення центра сферичної поверхні деформуючого пуансона відносно центра обертання диска $R_3=15$ мм, $R_b=5$ мм

Умова (25) визначає максимально допустиме значення перекриття гвинтового робочого органу та деформуючого пуансона. На основі нерівності (25) побудовано графічні залежності максимально допустимого значення перекриття гвинтового робочого органу та деформуючого пуансона від геометричних параметрів процесу (рис. 3, 4, 5).

Виведені залежності, які дають можливість встановлювати силові параметри процесу поверхневого зміцнення. Запропоновано конструк-

цію обкатного інструменту для дослідження зміцнення гвинтових поверхонь робочих органів.

Наведено графічні залежності для збільшення максимально допустимого значення перекриття гвинтової поверхні робочого органу та деформуючого пуансона від радіуса гвинтового робочого органу, по якому проходить зміцнення поверхні $\mu_1=0,8$, $R_1=60$ мм, від радіуса розміщення центра сферичної поверхні деформуючого пуансона відносно центра обертання диска при параметрах $R_3=15$ мм, $R_b=5$ мм, від

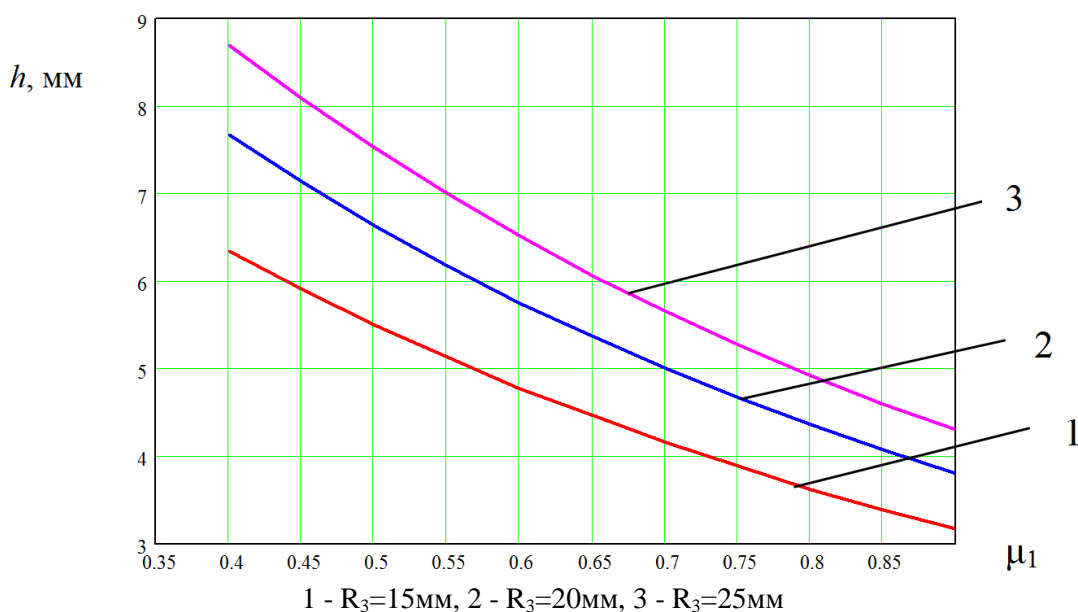


Рисунок 5 – Графіки залежності максимально допустимого значення перекриття гвинтового робочого органу та деформуючого пуансона від коефіцієнта тертя між поверхнями деформуючого пуансона та диска, $R_b=5$ мм, $R_1=70$ мм

коефіцієнта тертя між поверхнями деформуючого пуансона та диска при параметрах $R_b=5$ мм, $R_1=70$ мм.

Література

1 Богомолова Н.А. Металлография и общая технология металлов / Н.А. Богомолова, Л.К. Гордиенко. – М.: Высшая школа, 1983. – 270 с.

2 Морозов Е.М. Контактные задачи механики разрушения / Е.М. Морозов, М.В. Зернин. – М.: Машиностроение, 1999. – 554 с.

3 Киричек А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием / Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. – М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.

4 Статико-импульсное упрочнение деталей передач / Киричек А. В. [та ін.] // Теория и практика зубчатых передач: труды международной конференции – Ижевск, 1998. – С. 363-368.

5 Упрочнение статико-импульсной обработкой ШПД с использованием гидроударных устройств / А. Г. Лазуткин [та ін.] // Механизмы и машины ударного периодического и вибрационного действия: Материалы междунар. научного симпозиум. Орел. – Огел ГТУ, – 2000. – С. 318 – 320.

6 Упрочнение статико-импульсной обработкой сердечников крестовин стрелочных переводов / Лазуткин А. Г. [та ін.] // Автотракторостроение. Промышленность и высшая школа: Тезисы докл. XXVII науч.-техн. конф. – М.: ААИ, 1999. – С. 17 – 19.

7 Упрочнение статико-импульсной обработкой / Лазуткин А. Г. [та ін.] // Новые материалы и технологии в машиностроении и приборостроении: Материалы науч.-техн. конф. – Пенза, 1996. – С. 26 – 31.

8 Картанов Л.В. Повышение долговечности деталей машин использованием материалов с регулярной гетерогенной структурой: дис. канд. техн. Наук / Картанов Леонид Владимирович. – ВлГУ, 1997. – 170 с.

9 Киричек А.В. Обеспечение качества неососных винтовых механизмов деформационным упрочнением их сопрягаемых деталей: дис. докт. техн. наук / Киричек Анатолий Владимирович. – М., 1999. – 394 с.

10 Применение деформационного упрочнения статико-импульсной обработкой для повышения контактной выносливости деталей / Киричек А.В. [и др.] // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: Матер. Межд. науч.-техн. конф. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2008. – С 16-20. – 252 с.

11 Дрозд М.С. Определение механических свойств металлов без разрушения / М.С. Дрозд. – М.: Металлургия, 1965. – 171 с.

12 Патент на корисну модель № 108422. Україна, МПК(2006.01) В24В 39/04. Обкатний інструмент для зміцнення гвинтових робочих органів / Ляшук О. Л.; Сокіл М. Б.; Третяков О. Л.; Навроцька Т. Д.; Клендій В.М.; Марчук Р.М. (Україна). – u201601511. Заявл. 18.02.2016.; Опубл. 11.07.2016р., Бюл. № 13. – 4 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
15.02.18

Рекомендована до друку
професором **Копеєм Б.В.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором **Маруцаком П.О.**
(Тернопільський національний технічний
університет ім. І. Пулюя, м. Тернопіль)