https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-72
УДК 621.664

ЩЕРБИНА КИРИЛ
Центральноукраїнський національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0002-1665-7686
e-mail: kir2912s@ukr.net
МАЖАРА ВІТАЛІЙ
Центральноукраїнський національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0001-7451-3798
e-mail: majara@ukr.net
ТОРЧІЛОВ ДАНИЛО
Центральноукраїнський національний технічний університет
https://orcid.org/0009-0007-6224-1618
e-mail: dtorch99@gmail.com
ЗАЇКА АНДРІЙ
Центральноукраїнський національний технічний університет
https://orcid.org/0009-0009-2828-9751
e-mail: zaika_andrii@ukr.net
МАСЛЯНІКОВ ВІТАЛІЙ
Центральноукраїнський національний технічний університет
e-mail: maslenikovvitaliu@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЗДВОЖНЬОЇ СТАЛОСТІ ПРУЖНО-ГВИНТОВОГО ХОНУ З ГВИНТОВИМИ КАНАВКАМИ

Удосконалення функціональних характеристик машин, механізмів та обладнання, широко використовуваних у сучасному машинобудуванні, можливе завдяки оптимізації операцій фінішної обробки. Одним із ключових факторів, що визначають підвищення ефективності роботи гідравлічних машин і паливних систем двигунів внутрішнього згоряння, є якість виготовлення деталей керуючої апаратури. Основними показниками якості в цьому контексті виступають шорсткість поверхні та наявність макронерівностей. Досягнення необхідних параметрів якості на фінішних етапах обробки отворів залежить від застосування процесу хонінгування.

Гнучкість процесу хонінгування визначається можливістю адаптації режимів обробки до наявних геометричних відхилень. Водночас одним із головних недоліків традиційних хонінгувальних головок є їх конструкція, яка базується на використанні розтискного клина. Цей елемент забезпечує регулювання радіального розміру та створення питомого тиску на оброблювану поверхню. Однак регулювання радіального розміру відбувається в зоні малих переміщень, що обумовлює функціонування розтискного клина в режимі переходу від статичного до кінетичного тертя.

У статті аналізується процес деформації пружно-гвинтового хону в осьовому напрямку з урахуванням різних конструктивних виконань замкненого гвинтового пазу. На основі проведених досліджень розроблено математичні моделі деформації вигину геометричної осі пружно-гвинтового хону під дією статичних навантажень, враховуючи додатковий опір, спричинений пружними деформаціями. Для верифікації отриманих математичних моделей виконано дослідження твердотільної моделі методом кінцевих елементів у середовищі SolidWorks Simulation. У результаті було визначено оптимальну конструкцію пружно-гвинтового хону.

Ключові слова: хонінгувальна головка, пружно-гвинтовий хон, система регулювання радіального розміру, пружна-деформація, пружно-деформуєма оболонка, зона малих переміщень.

SHCHERBYNA KYRYL
MAZHARA VITALII
TORCHILOV DANYLO
ZAIKA ANDRII
MASLIANIKOV VITALII
Central Ukrainian National Technical University

STUDTY OF LONGITUDINAL STABILITY OF HELICAL HONE WITH HELICAL GROOVES

Improving the functional characteristics of machines, mechanisms and equipment widely used in modern engineering is possible by optimising finishing operations. One of the key factors that determines the efficiency of hydraulic machines and fuel systems of internal combustion engines is the quality of the parts of the control equipment. The main quality indicators are surface roughness and the presence of macro-irregularities. The achievement of the required quality parameters in the finishing stages of bore machining depends on the application of the honing process.

The flexibility of the honing process is determined by the ability to adapt the machining modes to the existing geometric deviations. At the same time, one of the main disadvantages of traditional honing heads is their design, which is based on the use of an expansion wedge. This element allows the radial dimension to be adjusted and a specific pressure to be applied to the surface being machined. However, the adjustment of the radial dimension takes place in the zone of small displacements, which causes the expansion wedge to operate in the mode of transition from static to kinetic friction.

The paper analyses the process of deformation of an elastic screw hone in the axial direction, taking into account various designs of a closed screw groove. On the basis of the research conducted, mathematical models of the bending deformation of the geometric axis of the elastic screw hone under the action of static loads are developed, taking into account the additional resistance caused by elastic deformations. In order to verify the obtained mathematical models, a solid model was studied using the finite element method in the SolidWorks simulation environment. As a result, the optimal design of the elastic screw shank was determined.

Keywords: honing head, elastic screw hone, radial dimensional control system, elastic deformation, elastic deformable shell, small displacement zone.

Постановка проблеми

Сучасні конструкції деталей гідравлічних машин характеризуються наявністю прецизійних отворів із переривчастими поверхнями, що ускладнює забезпечення необхідної геометричної форми та низької шорсткості. У більшості випадків завершальним етапом обробки таких отворів є процес хонінгування, що робить актуальним підвищення ефективності цього процесу для переривчастих і прецизійних отворів. Основними завданнями є забезпечення високої точності розмірів, геометричної форми та зниження шорсткості поверхонь шляхом удосконалення характеристик алмазно-абразивного інструменту. Відповідно, обумовлені показник процесу хонінгування отворів є актуальним науковим завданням.

Аналіз досліджень та публікацій

На основі проведеного аналізу існуючих алмазно-абразивних інструментів (хонінгувальної головки та алмазної розвертки) для обробки отворів [1, 2, 3] виявлено низку недоліків.

Перш за все, хонінгувальна головка демонструє обмежену здатність оперативно реагувати на зміну сили різання, що виникає через геометричні відхилення оброблюваного отвору як у поздовжньому, так і в поперечному перерізах. Цей негативний ефект обумовлений наявністю статичного і кінематичного тертя в кінематичних ланках конструкції хонінгувальної головки [4,5]. Крім того, обробка шліцевих та переривчастих отворів малого діаметра створює технічні труднощі, пов'язані з ускладненням конструкції хонінгувальної головки та обмеженнями щодо мінімального діаметра оброблюваних отворів [6].

Друге, алмазна розвертка виявляється непридатною для застосування в умовах автоматизованого виробництва. Це зумовлено необхідністю ручного налаштування розміру для обробки та постійного контролю за процесом зношування інструменту, що значно ускладнює її використання в сучасних автоматизованих технологічних лініях.

Для вирішення зазначених проблем було запропоновано пружно-гвинтовий хон [7,8], який дозволяє усунути недоліки існуючих алмазно-абразивних інструментів шляхом використання пружних деформацій для збільшення радіального розміру та розташування алмазно-абразивних брусків під кутом 45º. Однак у запропонованій конструкції пружно-гвинтового хону залишається низка невирішених питань, зокрема, пов'язаних із визначенням форми деформації геометричної осі інструмента.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: аналіз осьової деформації пружно-гвинтового хону в залежності від варіантів його конструктивного виконання.

Виклад основного матеріалу

При навантаженні пружно-деформуєма оболонка (ПДО), яка є корпусом пружно-гвинтового хону в умовах SolidWorks не вдалося виявити наявність просторових неврівноважених пружних деформацій. Тому, було прийнято рішення про проведення подальшого аналітичного дослідження шляхом визначення напружень опору в кожному із повздовжніх діаметральних перерізів по довжині кола ПДО.

При цьому було прийнято ряд умов:

1. Напруження опору пропорційне розмірам перерізу розміщених в оппозитно діаметральних площинах.

2. Пружні деформації в діаметральних площинах залежать від сумарних розмірів перерізів, які розміщенні в даній однойменній стороні.

3. Аналіз здійснюється для двох пружних тіл, одне з яких утворює гвинтові лінії замкненого наскрізного пазу і гвинтові лінії канавок під абразивним бруском однойменного напряму, та інше тіло, в якому обумовлені гвинтові лінії – різнойменного напряму.

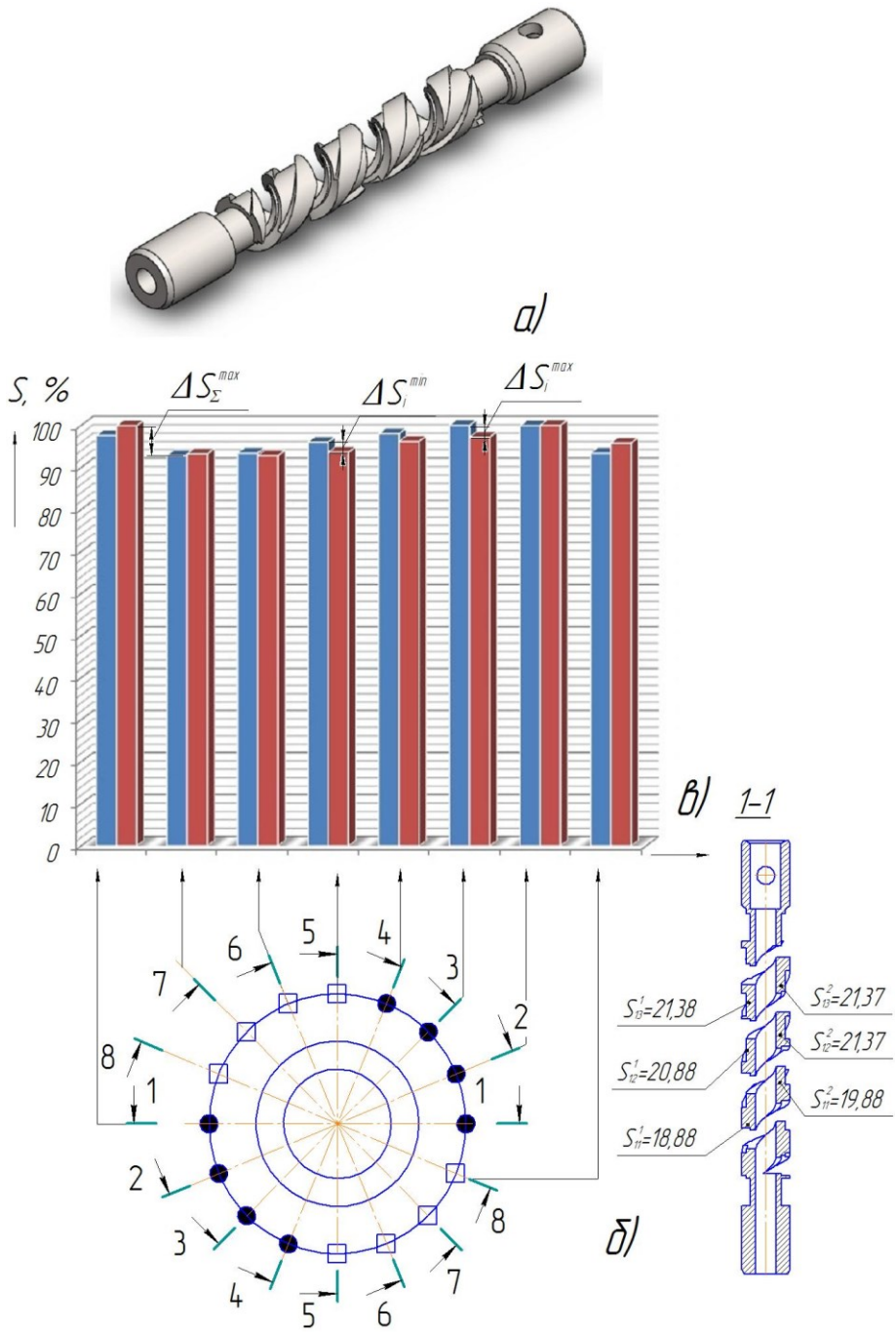
4. Вхідним параметром при дослідженні приймають деформації повздовж власної геометричної вісі пружного тіла, а вихідними параметрами – напруження, які виникають в перерізах ПДО і прийняті, як адекватні до пружних деформацій..

Для ПДО з однойменно направленими гвинтовими лініями (рис. 1, а) визначимо площу витків у перерізі для знаходження напружень опору в вісьмох випадковим, чином розміщених діаметральних площинах (рис. 1, б). Різниця між сумарною площею перерізів витків розміщених на різних боках ΔS дасть можливість дослідити наявність неврівноваженого опору в процесі деформації та буде визначається за наступним рівнянням:

$$\Delta S_p = (S_{i1}^1 + S_{i2}^1 + S_{i3}^1) - (S_{i1}^2 + S_{i2}^2 + S_{i3}^2), \quad (1)$$

де S_{i1}^1 – площа першого витка і-того перерізу.

На підставі отриманих даних, побудуймо графік розміщення сумарних розмірів перерізів в діаметральних площинах, які випадково розміщенні по колу для ПДО з однойменними напрямком гвинтового паза і паза під алмазно-абразивні бруски (рис. 1 в).розмірів перерізів в діаметральних площинах, які випадково розміщенні по колу для ПДО з однойменними напрямком гвинтового паза і паза під алмазно-абразивні бруски (рис. 1, в). Максимальна різниця перепаду сумарної площі витків в одному перерізі знаходиться в межах 2,5 %, а максимальна різниця перепаду сумарної площі витків в межах всього периметру знаходиться в межах 7,1%. На підставі цього можна припустити, що коливання неврівноваженого опору в межах 7,1%



S_i^{min} –мінімальне значення перепаду площ в одному перерізі;

S_i^{max} – максимальне значення перепаду площ в одному перерізі;

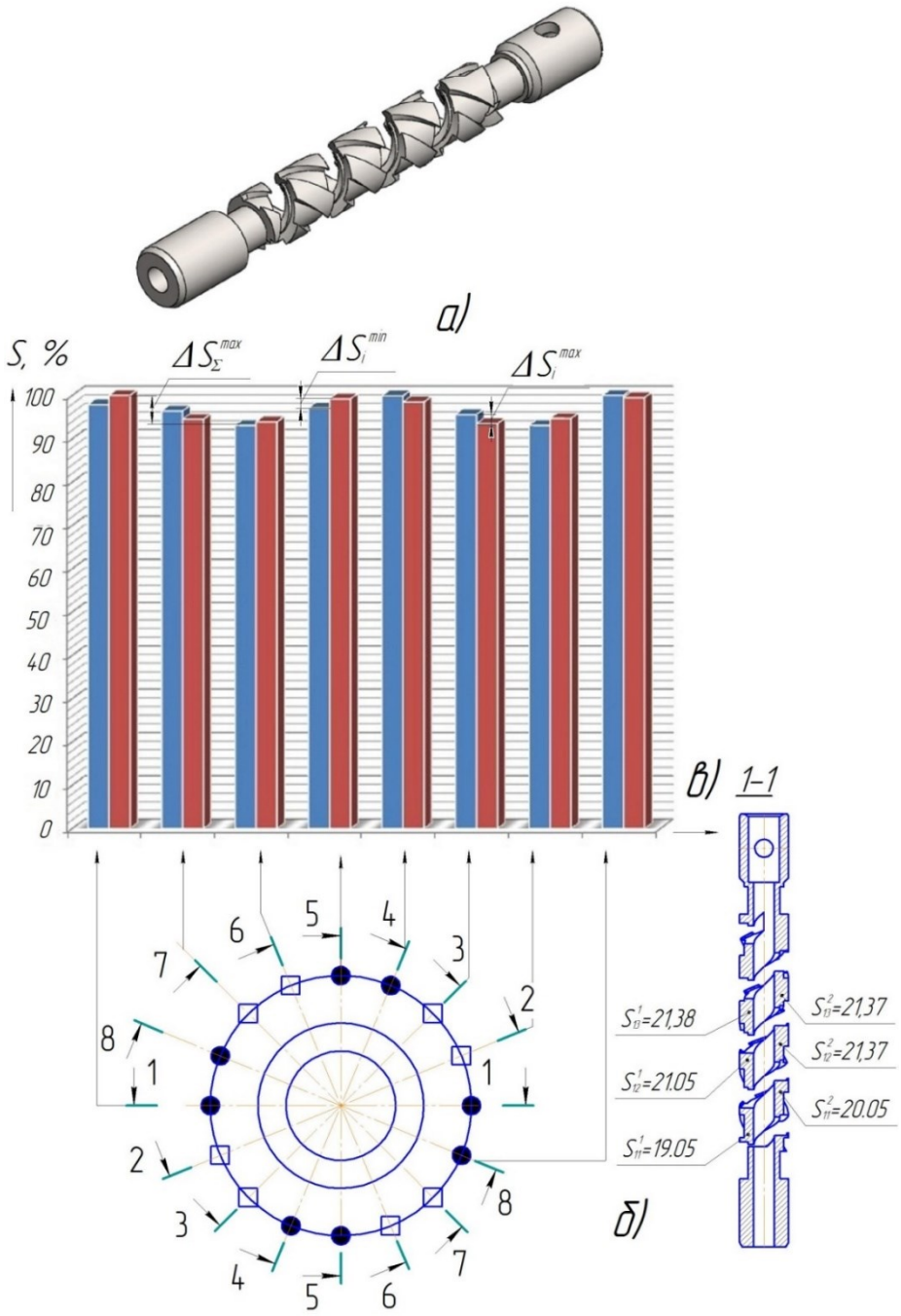
S_Σ^{max} – максимальне значення перепаду площ в межах всього периметру;

● – максимальне значення площ в перерізі; □ – мінімальне значення площ в перерізі

Рис. 1. Пружно-деформуєма оболонка з однойменно направленими гвинтовими лініями а) твердотільна модель ПДО з однойменними напрямком гвинтового паза і паза під алмазно-абразивні бруски; б) випадковим чином розміщенні діаметральні площини; в) графік розміщення сумарних розмірів перерізів в діаметральних площинах, які випадково розміщенні по колу ПДО.

Для пружно-деформуємої оболонки (ПДО) з різнойменно направленими гвинтовими лініями (рис.2,а) визначимо площу витків у перерізі для знаходження напружень опору в вісьмох положеннях (рис. 2,б).

Наведені вище моделі та приклади розрахунків демонструють виявлений вплив параметрів кіл живлення та коефіцієнтів K_I, K_V, K_0 на зміщення точки оптимального відбору енергії фотовольтаїчного джерела. Відтак, отримані результати представляють собою подальший розвиток методу точки максимальної потужності МРРТ. Ці результати особливо важливі при проектуванні малопотужних пристроїв фотовольтаїки, зокрема сенсорних пристроїв IoT з фотовольтаїчним живленням.



S_i^{min} –мінімальне значення перепаду площ в одному перерізі;

S_i^{max} – максимальне значення перепаду площ в одному перерізі;

S_{Σ}^{max} – максимальне значення перепаду площ в межах всього периметру;

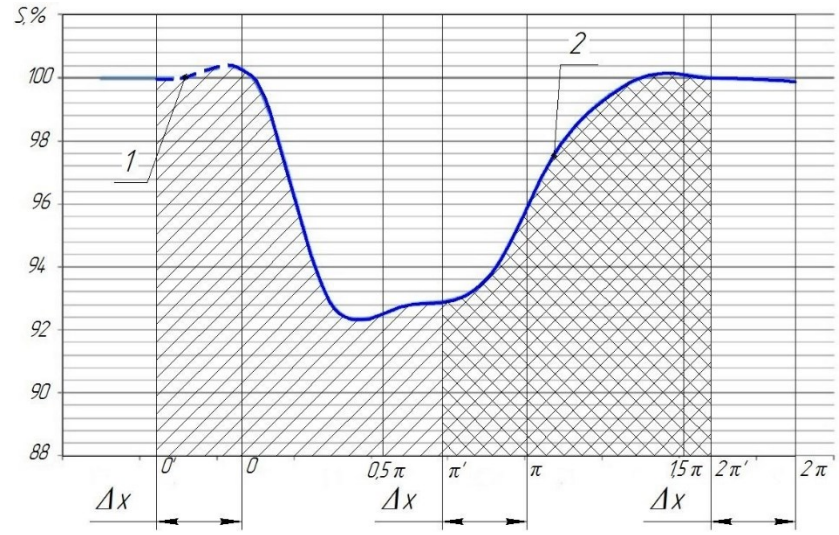
● – максимальне значення площ в перерізі; □ – мінімальне значення площ в перерізі

Рис. 2. Пружно-деформуєма оболонка з різнойменними направленими гвинтовими лініяма) твердотільна модель ПДО з різнойменним напрямком гвинтового паза і паза під алмазно-абразивні бруски; б) випадковим чином розміщенні діаметральні площини; в) графік розміщення сумарних розмірів перерізів в діаметральних площинах, які випадково розміщенні по колу ПДО

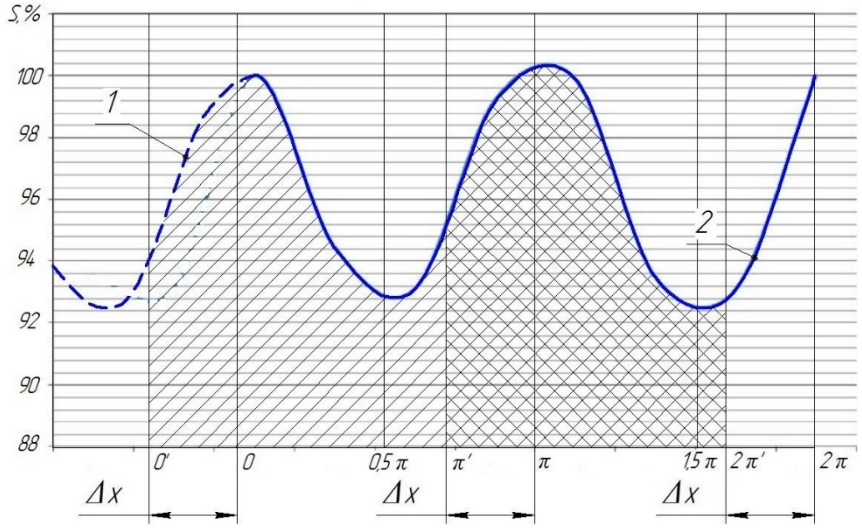
На підставі отриманих даних, побудуємо графік розміщення сумарних розмірів перерізів в діаметральних площинах, які випадково розміщенні по колу для ПДО з різнойменним напрямком гвинтового паза і паза під алмазно-абразивні бруски (рис.2, в). Максимальна різниця перепаду сумарної площі витків в одному перерізі знаходиться в межах 2,1 %, а максимальна різниця перепаду сумарної площі витків в межах всього периметру знаходиться в межах 6,8%. На підставі цього можна припустити, що коливання неврівноваженого опору в межах 6,8%

Отже, різниця між площами перерізів витків розміщених по різні боки в ПДО з різнойменними направленими гвинтовими лініями менша за ПДО з однойменними направленими гвинтовими лініями.

Для визначення перепаду площ по всьому периметру для ПДО з однойменними гвинтовими лініями та ПДО з різнойменними гвинтовими лініями побудуємо графік (рис. 2)



а)



б)

1 – переріз Δxπ; 2 – переріз π. Δx – велична зсуву перерізу.

Рис. 3. Графік зміни сумарних площ перерізів в межах контуру ПДО а) ПДО з однойменними гвинтовими лініями; б) ПДО з різнойменними гвинтовими лініями

На підставі графіку (рис.2, а) екстремальні точки (максимальні і мінімальні значення площ перерізів) в ПДО з однойменними гвинтовими лініями розміщені скупчено одна за одною, що може сприяти впливу неврівноваженого опору на виникнення пружних деформацій вигину. Велична площ в лівій і правій частині ПДО з однойменними гвинтовими лініями не співпадає в будь якому перерізі, що підтверджує графік зміни сумарних площ перерізів контуру (рис.3, а). Зміна сумарних площ перерізів в межах контуру ПДО з однойменними гвинтовими лініями буде характеризуватися наступним рівнянням:

$$S_\Sigma = 0{,}036x^4 - 0{,}904x^3 + 7{,}665x^2 - 24{,}20x + 117{,}3, \quad (2)$$

Екстремальні точки (максимальні і мінімальні значення площ перерізів) ПДО з різнойменними гвинтовими лініями розміщені рівномірно по контуру і чергуються друг з другом з кроком 0,5π, що повинно забезпечити врівноважений опір.

Велична площ в лівій і правій частині ПДО з різнойменними гвинтовими лініями рівні в будь якому перерізі, що підтверджує графік зміни сумарних площ перерізів контуру (рис.3, б). Зміна сумарних площ перерізів в межах контуру ПДО з різнойменними гвинтовими лініями буде характеризуватися наступним рівнянням:

$$S_\Sigma = 0{,}037x^6 + 1{,}035x^5 - 10{,}89x^4 + 55{,}77x^3 - 141{,}5x^2 - 162{,}7x + 32{,}98, \quad (3)$$

Для підтвердження даного припущення проведемо дослідження деформації обумовлених ПДО в середовищі SolidWorks Simulation за методикою наведеною в [9,10].

Після деформування ПДО з однойменними направленими гвинтовими лініями отримані наступні результати розподілення навантаження (рис. 4, а) та деформації витків. (рис. 4, б).

Отримані напруження при деформації ПДО з однойменним направленими гвинтовими лініями однакове для всіх робочих витків і знаходиться в межах 300МПа, а для вхідного та вихідного витків в межах 150 МПа. . А величина деформації дещо відрізняється в канавках, які призначенні для розміщення алмазно-абразивних брусків. Деформація обумовлених канавок менша за деформацію поверхонь витків.

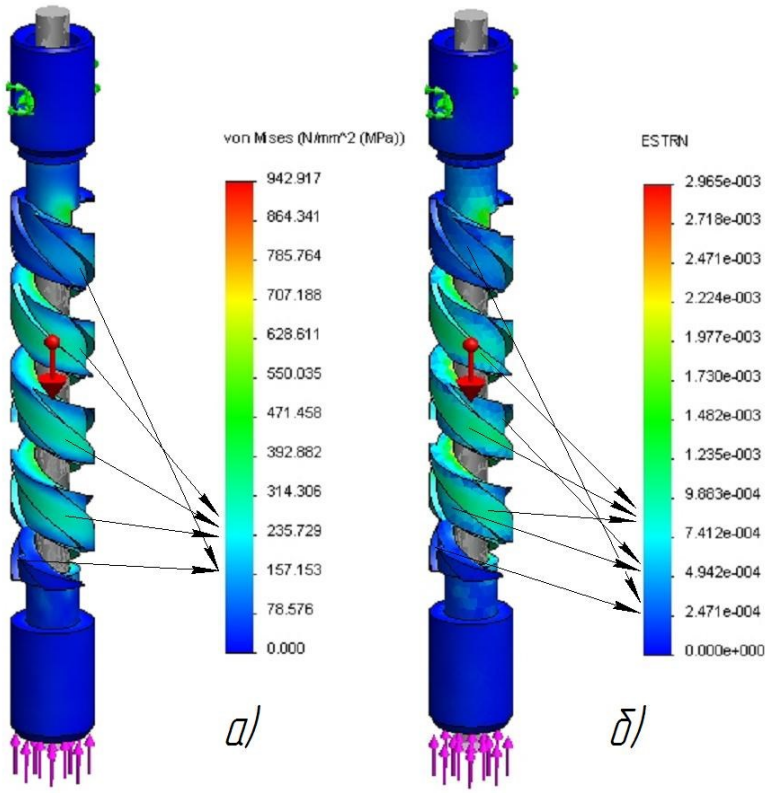


Рис. 4. Пружно-деформуєма оболонка з однойменними направленими гвинтовими лініями з деформацією вздовж власної геометричної вісі в межах в 1 мм.: а) напруження ПДО, МПа ; б) деформація ПДО в умовних одиницях ESTRN (еквівалентна деформація);

Після деформування ПДО з різнойменними направленими гвинтовими лініями отримані наступні результати розподілення навантаження (рис.4, а) та деформації витків. (рис.5, б).

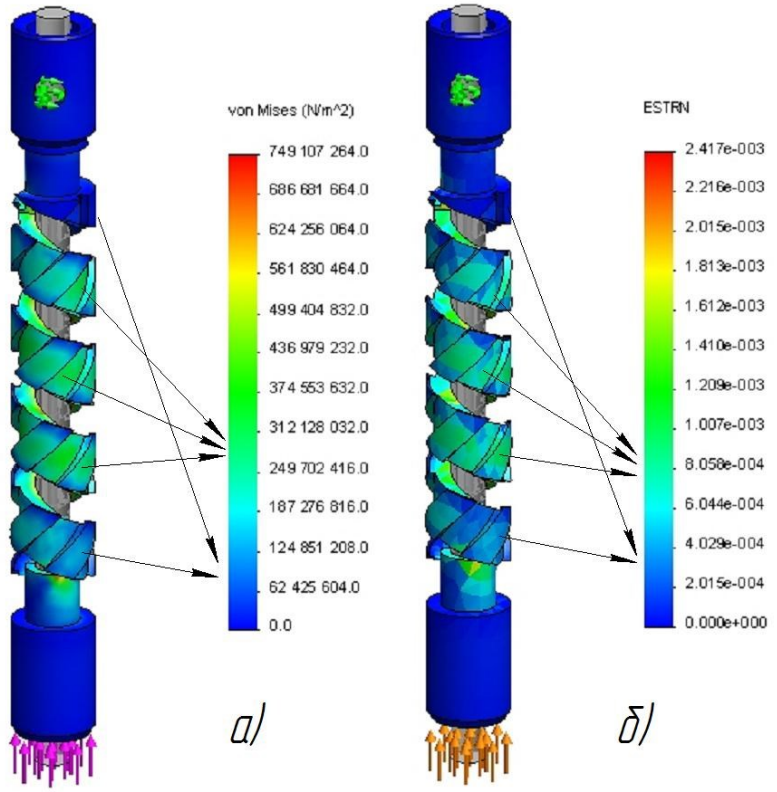


Рис. 5. Пружно-деформуєма оболонка з різнойменними направленими гвинтовими лініями з деформацією вздовж власної геометричної вісі в межах в 1 мм.: а) напруження ПДО, МПа ; б) деформація ПДО в умовних одиницях ESTRN (еквівалентна деформація)

Напруження при деформації ПДО з різнойменним направленими гвинтовими лініями однакове для всіх робочих витків і знаходиться в межах 300МПа, а для вхідного та вихідного витків знаходиться 124МПа. А величина деформації також має однакове значення по всій довжині робочих витків.

Висновки

В результаті дослідження визначено, що ПДО з однойменними гвинтовими лінями має значення максимально неврівноваженого опору в межах однієї площини – 2,5% і в межах всього контуру – 7,1%.

Екстремальні точки (максимальні і мінімальні значення площ перерізів) в ПДО з однойменними гвинтовими лінями розміщені нерівномірно одна за одною, що може сприяти впливу неврівноваженого опору на виникнення пружних деформацій вигину.

ПДО з різнойменними гвинтовими лінями має значення максимально неврівноваженого опору в межах однієї площини – 2,1% і в межах всього контура – 6,8%.

Екстремальні точки (максимальні і мінімальні значення площ перерізів) ПДО з різнойменними гвинтовими лініями розміщені рівномірно по контуру і чергуються один з одним, що повинно забезпечити врівноважений опір. ПДО з різнойменними гвинтовими лініями має в будь-якій діаметральній площині рівність значення сумарних площ опозитних сторін обумовленої площини.

На підставі аналізу конструкція ПДО з різнойменними гвинтовими лінями має перевагу над ПДО з однойменними гвинтовими лінями.

Література

1. Lawrence K.D., Ramamoorthy B. Multi-surface topography targeted plateau honing for the processing of cylinder liner surfaces of automotive engines // *Applied Surface Science.* – 2016. – № 365. – С. 19-30.
2. Demirci I., Mezghani S., Yousfi M., El Mansori M. Impact of superficial surface texture anisotropy in helical slide and plateau honing on ring-pack performance // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology.* – 2015. – № 230. – С. 1030-1037.
3. Deshpande A.K., Bhole H.A., Choudhari L.A. Analysis of super-finishing honing operation with old and new plateau honing machine concept // *International Journal of Engineering Research and General Science.* – 2015. – № 3. – С. 812-818.
4. Paswan S.K., Bedi T.S., Singh A.K. Modeling and simulation of surface roughness in magnetorheological fluid based honing process // *Wear.* – 2017. – № 376-377. – С. 1207-1221.
5. Arantes L.J., Fernandes K.A., Schramm C.R., Silveira Leal J.E., Piratelli-Filho A., Franco S.D., Arencibia R.V. The roughness characterization in cylinders obtained by conventional and flexible honing processes // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2017. – № 93. – С. 635-649.
6. Gehring-group. URL: https://gehring-group.com/en/honing/tools/ (дата звернення: 20.01.2025).
7. Щербина К.К., Гречка А.І., Мажара В.А., Дяченко Т.В. Kinematics of cutting process while honing holes with a hone with variable geometry of sticks // *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин.* – Кіровоград: КНТУ, 2020. – Вип. 50. – С. 159-164.
8. Щербина К.К., Підгаєцький М.М., Мажара В.А., Гречка А.І., Дяченко Т.В. Експериментальне дослідження деформації пружно-гвинтового хона // *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: зб. наук. пр.* – Кропивницький: ЦНТУ, 2022. – Вип. 5 (36). – Ч. 2. – С. 31-38.
9. Підгаєцький М.М., Щербина К.К. Дослідження повздовжньої сталості пружно-гвинтового хону // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології машинобудування.* – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – № 6 (1282). – С. 8-12.
10. Scherbyna K. Mechanics of contact interaction of elastic helical hone and machining surface // *Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки.* – Хмельницький: ХНУ, 2019. – № 4 (275). – С. 15-21.

References

1. Lawrence K.D., Ramamoorthy B. Multi-surface topography targeted plateau honing for the processing of cylinder liner surfaces of automotive engines // Applied Surface Science. – 2016. – № 365. – S. 19-30.
2. Demirci I., Mezghani S., Yousfi M., El Mansori M. Impact of superficial surface texture anisotropy in helical slide and plateau honing on ring-pack performance // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. – 2015. – № 230. – S. 1030-1037.
3. Deshpande A.K., Bhole H.A., Choudhari L.A. Analysis of super-finishing honing operation with old and new plateau honing machine concept // International Journal of Engineering Research and General Science. – 2015. – № 3. – S. 812-818.
4. Paswan S.K., Bedi T.S., Singh A.K. Modeling and simulation of surface roughness in magnetorheological fluid based honing process // Wear. – 2017. – № 376-377. – S. 1207-1221.
5. Arantes L.J., Fernandes K.A., Schramm C.R., Silveira Leal J.E., Piratelli-Filho A., Franco S.D., Arencibia R.V. The roughness characterization in cylinders obtained by conventional and flexible honing processes // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – № 93. – S. 635-649.
6. Gehring-group. URL: https://gehring-group.com/en/honing/tools/ (data zvernennia: 20.01.2025).
7. Shcherbyna K.K., Hrechka A.I., Mazhara V.A., Diachenko T.V. Kinematics of cutting process while honing holes with a hone with variable geometry of sticks // Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn. – Kirovohrad: KNTU, 2020. – Vyp. 50. – S. 159-164.
8. Shcherbyna K.K., Pidhaietskyi M.M., Mazhara V.A., Hrechka A.I., Diachenko T.V. Eksperymentalne doslidzhennia deformatsii pruzhno-hvyntovoho khona // Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky: zb. nauk. pr. – Kropyvnytskyi: TsNTU, 2022. – Vyp. 5 (36). – Ch. 2. – S. 31-38.
9. Pidhaietskyi M.M., Shcherbyna K.K. Doslidzhennia povzdovzhnoi stalosti pruzhno-hvyntovoho khonu // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriia: Tekhnolohii mashynobuduvannia. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2018. – № 6 (1282). – S. 8-12.
10. Scherbyna K. Mechanics of contact interaction of elastic helical hone and machining surface // Herald Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu: Tekhnichni nauky. – Khmelnytskyi: KhNU, 2019. – № 4 (275). – S. 15-21.