

Вплив кінематики процесу різьбоформування на якість гладко-різбового з'єднання

Л. М. Данилова¹ • С. В. Лапковський¹ • В. П. Приходько¹ • В. К. Фролов¹

Received: 4 December 2024 / Revised: 25 March 2025 / Accepted: 22 May 2025

Анотація. Ефективність технологій складальних операцій із застосуванням різбових деталей визначається продуктивністю, економічністю і якістю одержуваних з'єднань. Використанням в складальних процесах різьбоформуючих кріпильних деталей досягається зниження трудомісткості шляхом усунення операції попереднього різьбонарізання, а отримані з'єднання є більш точними і мають кращі стопорні якості. Різьбоформуючі деталі закручуються в гладкі отвори і утворюють різьбу різанням або деформуванням. Такі з'єднання називають гладко-різбовими. У виробництві, де небажане утворення стружки, застосовують різьбовидавлюючі гвинти. Різьбові з'єднання працюють в умовах знакозмінних навантажень і для них є важливим фактор циклічної довговічності. Однак при тому, що різьба, утворена пластичним деформуванням, має високу міцність, показники циклічної довговічності такої різьби нижчі ніж у нарізаній різьби. Підвищення якості гладко-різбових з'єднань шляхом навантаження оптимальною осьовою силою при різьбоформуванні є темою цієї публікації.

Причиною зниження втомних характеристик накатаної різьби є зворотній рух металу, що викликаний порушенням кінематики при формуванні різбового профілю. Метою даної роботи є встановлення закономірності процесу течії матеріалу в зоні найбільших деформацій під дією осьової і радіальної сил різьбоформування на основі теорії пластичності, а також отримання аналітичної залежності для розрахунку компенсуючої сили різьбоформування на основі розв'язання задачі вдавлювання жорсткого клину в жорстко-пластичну область. Експериментально підтвердити вплив осьової некомпенсованої сили на якість гладко-різбового з'єднання. Деформація в процесі різьбоформування характеризується тим, що рух або деформація, відбувається в одній площині, і це є станом плоскої деформації. Обчислювати контактні напруження і деформуючі зусилля, визначати поля напружень в перетинах металу, що деформується, аналізувати локальні явища для вирішення технологічних задач, дозволяє метод ліній ковзання. Характеристики плоскої пластичної деформації дають можливість вирішувати такі задачі графічним методом. Цей метод визначає картину поля ліній ковзання, а його геометричні параметри встановлюють залежність між максимальним дотичним напруженням і деформуючим зусиллям. На основі положень теорії пластичності установлені закономірності, що описують процеси течії металу в зоні найбільших деформацій під дією осьової і радіальної сил різьбоформування. На основі вирішення задачі теорії пластичності про вдавлювання ідентора в жорстко-пластичну область отримані аналітичні залежності для розрахунку технологічних параметрів різьбоформування. На основі аналізу жорстко-пластичної зони в області найбільших деформацій встановлені закономірності впливу осьової сили різьбоформування на параметри отриманого профілю. Результати роботи дозволять підвищити якість з'єднання з різьбоформуючою кріпильною деталлю за рахунок уведення в процес різьбоформування компенсуючого осьового навантаження. Забезпечення правильного гвинтового руху при утворенні різьби запобігає зворотньому руху металу, виникненню поверхневих дефектів і релаксації корисних стискуючих напружень, що підвищує циклічну довговічність різьби. А формування симетричного профілю збільшує міцність з'єднання і покращує його стопорні якості. На основі аналізу закономірності формування поверхневого шару обґрунтовано вибір кута підйому західного витка гвинта.

Ключові слова: складальна операція; різьбоформування; пластичне деформування.

Вступ

✉ Л. М. Данилова
danylova.liudmyla@iitl.kpi.ua

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

Різьбові з'єднання є одними з найбільш поширених з'єднань, не зважаючи на їх трудомісткість, яка досягає 35–40 % загальної трудомісткості складальних робіт. Трудомісткість складальних операцій з різбовими деталями залежить від типу з'єднання (болтове,

гвинтове, шпилькове), який обумовлює кількість деталей, що застосовані в з'єднанні, кількість технологічних переходів і виконавчих пристроїв. З цих позицій переважними є гвинтові з'єднання, автоматичне устаткування яких вимагає не більше 10-ти виконавчих пристроїв. Ефективність технологій складання різьбових з'єднань визначається продуктивністю, економічністю і якістю одержуваних з'єднань. Одним із напрямків покращення даних показників є застосування складальних процесів з використанням різьбоформуючих кріпильних деталей. Різьбоформуючі гвинти, шпильки, втулки загвинчуються в гладкі отвори і самі утворюють різьбовий профіль різанням або деформуванням. Зниження трудомісткості досягається усуненням операції попереднього різьбоутворення, а отримані з'єднання є більш точними та мають стопорні властивості. Такі з'єднання називають гладко-різьбовими з'єднаннями.

Відомо, що статична міцність гладко-різьбових з'єднань з величиною натягу від 30 %, до 100 %, отриманих самозатягуванням, вище, ніж у з'єднань з нарізаною різьбою в 1.5–2 рази, тоді як циклічна довговічність найчастіше виявляється навіть нижчою.

Метод пластичного деформування, що широко використовується для виготовлення різьби, дозволяє, за умови правильної організації процесу, підвищити втомні характеристики різьбових з'єднань внаслідок формування стискаючих напружень в западинах різьби.

У процесі формоутворення в деформованих деталях виникають неоднорідні поля деформацій і напружень. Неоднорідний напружено-деформований стан холодно деформованих металів супроводжується виникненням залишкових напружень у виробках, які суттєво впливають на їх механічні властивості. Основна причина меншої, ніж можна було б очікувати, міцності конструкційних матеріалів полягає в тому, що вони містять дефекти поверхні (складка, тріщина). Вони виникають у результаті виробничих і технологічних процесів та створюють високі локальні напруження. Дефект є місцем найбільшої концентрації напружень і вірогідним місцем руйнування. Особливо небезпечна поява дефекту у западині різьби, де виникає висока концентрація напружень, що створює суттєве зниження опору втомі.

В з'єднанні різьбовому з'єднанні мають місце нерівномірно розподілені зусилля по витках різьби і висока концентрація напружень, внаслідок малих радіусів закруглення в різьбовій западині. На перший виток різьби припадає максимальне навантаження, що в ряді випадків більше 30 % від загального [1]. Це призводить до суттєвого зниження опору втомі з'єднання. Крім того, на радіусній ділянці западини різьби створюється висока концентрація напружень, яка викликає додаткове значне зниження спротиву втомі. Коефіцієнт концентрації напруги у западині витка різьби досягає 4...10, а оскільки виток, отриманий пластичним

деформування обов'язково має дефекти, то з точки зору опору втомі перший виток різьбового з'єднання є найбільш вразливим.

Розповсюдженню зародкової тріщини перешкоджають, як відомо, стискаючі залишкові напруження в зміцненому шарі металу. На рис. 1 зображено модель складки глибиною 4 мм і шириною 2 мм в западині різьби в осьовому її перетині. Розрахунок напруженого стану в різьбі проводився методом скінченних елементів.

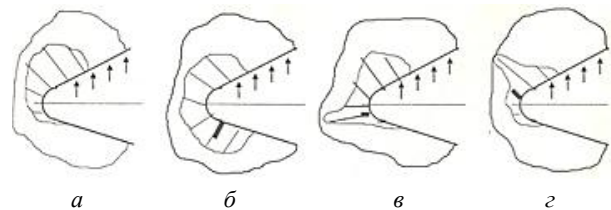


Рис. 1. Епюри напружень в западині найбільш навантаженого витка з дефектом: а) відсутній дефект в западині; б) дефект розташований на неробочій ділянці; в) дефект розташований у центрі западини; з) дефект розташований у зоні концентрації напружень

Модель напруженого стану в западині різьби демонструє, що при відсутності дефекту (дефект помічений рискою) в западині, найбільше напруження діє в зоні спряження радіусної ділянки профілю западини з прямолінійною гранню. Якщо дефект розташований на радіусній ділянці, що спряжена з неробочою гранню профілю різьби, то найбільші навантаження діють у зоні природної концентрації напружень. Це пояснюється тим, що стискаючі напруження на робочій грані витка компенсують напруження у зоні їх концентрації. При наявності дефекту в центрі западини максимальне напруження переміщується в точку розташування дефекту. У випадку розташування дефекту в зоні натуральної концентрації напружень максимальне напруження в цій точці різко зростає.

Мета роботи

Головними чинниками утворення поверхневих дефектів різьби є чинники, пов'язані з геометрією або кінематикою процесу, що призводять до осьового зміщення поверхневих шарів металу. Також відомо, що опір втомі залежить від характеру розподілу залишкових напружень в перетині профілю. З точки зору отримання, в зоні найбільшої деформації, сприятливої картини залишкових напружень, повинен бути такий розподіл, що не містить зон підвищеної деформації і залишкових напружень розтягування.

Умови формування профілю різьби є однією із основних причин виникнення поверхневих дефектів, що безпосередньо пов'язані з кінематикою процесу різьбоутворення. Видавлювання профілю різьби відбувається за рахунок перерозподілу елементарних об'є-

мів металу, що витісняється витками забірного конусу гвинта. При вдавлюванні у матеріал деталі, гвинт зустрічає осьовий спротив, який він долає або силою самоподачі, спираючись на готові витки, або за рахунок прикладання до нього додаткової сили. Гвинт одночасно є інструментом і копірним гвинтом, що забезпечує переміщення. Другим елементом у цій кінематичній парі є різьба, що формується, витки якої більш податливі у порівнянні з витками гвинта. При виникненні надлишкових сил, що прикладені до гвинта, сам гвинт починає порушувати закон гвинтового руху. На фотографії (рис. 2 а) помітна асиметрія видавленого профілю на протилежних гранях витка, в напрямку переміщення гвинта форма канавкової області приймає більш пологоу форму. На фотографії мікроструктури канавкової області (рис. 2 б), між другим і третім витками, сформованої різьби, спостерігаються мікрodefekти в місці переходу радіусної ділянки профілю канавки в грань на стороні, протилежній напрямку закручування гвинта.

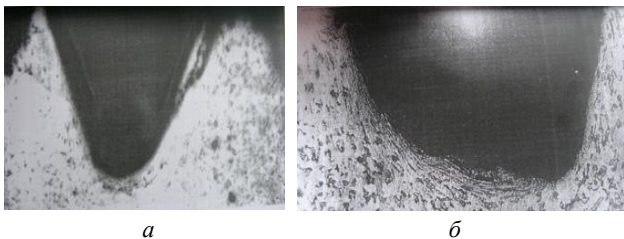


Рис. 2. Фотографії канавкової області різьби: а) сформованої за недостатньої осьової сили (150-разове збільшення); б) сформованої самоподачею (200-разове збільшення)

Дія некомпенсованої сили збільшує дефектність зміцненого шару і накладає на стискуючі напруження розтягуючі напруження в канавковій області, в результаті чого відбувається релаксація корисних стискуючих напружень. Це нейтралізує позитивний ефект пластичного деформування, а оскільки при пластичному деформуванні зростає кількість внутрішніх дефектів, то якість такої різьби нижча, ніж нарізаної.

Методика. Чисельні розрахунки. Результати та їх обговорення

Метод ліній ковзання дозволяє обчислювати контактні напруження і деформуючі зусилля, повністю визначати поля напружень і швидкостей в перетинах деформуємого металу, а також аналізувати локальні явища, які звичайно є основними у вирішенні технологічних задач [2]. Характер дії некомпенсованої сили на процес формування різьби можливо оцінити, побудувавши поле ліній ковзання з урахуванням цієї сили. При формуванні різьби на матеріал деталі діє деформуюча сила P_{rad} , з якою профіль різьби гвинта вдавлюється в матеріал деталі, а також некомпенсована

сила P_{oc} , вздовж осі гвинта. Поля ліній ковзання для відкритої прошивки і для випадку вдавлювання клину в жорстко-пластичну область відповідають деформації клином в осьовому і радіальному напрямках відповідно (рис. 3). Більш детально це питання розкрито в роботі [2].

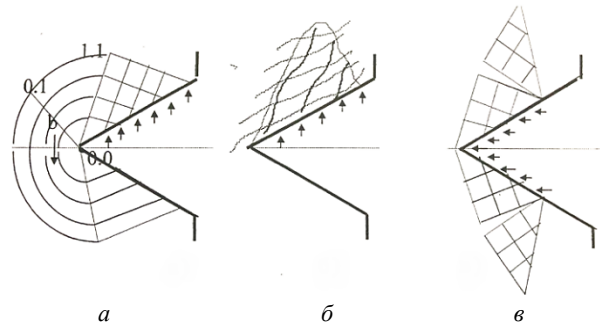


Рис. 3. Поле характеристик: а) відкритої прошивки; б) лінії току; в) впровадження клину в жорстко-пластичну область

На рис. 3 а, прямою 0.0-1.1 зображено жорстко-пластичну межу, що відділяє зону 0.0-0.1-1.1 підвищеної пластичної деформації. Вздовж цієї межі деформації зсуву ростуть необмежено, а матеріал, що виходить із зони пластичної течії, рухається як тверде тіло. Продовження поля напружень в жорстку область створює однорідне напруження тиску в канавковій області за межею 0.0-0.1. На рис. 3 б показано лінії вектору швидкості і лінії накопленої деформації, що побудовані на основі металографічних досліджень. Очевидно, що дія осьової сили збільшує твердість тієї грані витка, на яку вона діє, а це збільшує дефектність зміцненого шару. Також осьова сила накладає розтягуючі напруження в канавковій області на стискуючі напруження, що виникли від дії радіальних сил, у результаті чого відбувається релаксація останніх.

Якщо розглядати рис. 1 і 3 спільно, то очевидна несприятлива картина напружень у зоні найбільшого навантаження, а саме (рис. 1 з) в точці найбільшого навантаження, залишкові стискуючі напруження, що перешкоджають розповсюдженню тріщини, підпадають релаксації і тріщина безперешкодно виходить на поверхню. Крім того, при зворотному переміщенні металу можливе утворення складок і нашарувань, що також є концентраторами напружень.

Зворотній рух матеріалу нейтралізує позитивний ефект пластичного деформування, утворює поверхневі дефекти і це знижує циклічну довговічність різьби, утвореної пластичним деформуванням, у порівнянні з нарізаною різьбою. Оскільки причиною зниження циклічної довговічності різьби, отриманої пластичним деформуванням, є некомпенсована осьова сила, то пропонується в кінематику процесу різьбоформування ввести осьову компенсуючу силу. Визначення її величини ґрунтується на розрахунку величини радіальної сили різьбоформування, яка дорівнює добутку питомої радіальної сили на контактну площу.

Питома сила різьбоформування знаходиться на основі розв'язання задачі теорії пластичності про вдавлення клину в жорстко-пластичну область. Для приведення осової сили до радіальної, необхідно розглянути кінематику процесу і сили, що діють на виток різьби в процесі різьбоутворення. На рис. 4 зображено дію нормальних σ і дотичних τ напружень спротиву матеріалу, що деформується, та дію сил деформування. Нормальною силою спротиву деформації є нормальна сила P_n , і її складові: радіальна сила P_r , і осьова сила P_{oc} . Із рис. 5 нормальна сила тиску на контактну площину, приведена до осі гвинта, дорівнює:

$$P_{n.pr.} = P_n \cdot \cos \omega, \quad (1)$$

де ω – кут підйому витка різьби.

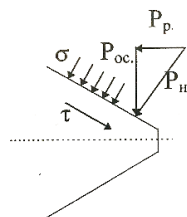


Рис. 4. Напруження спротиву на витку різьби

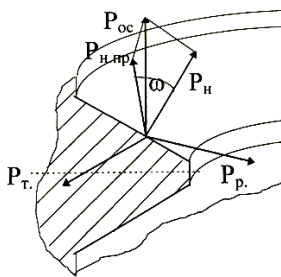


Рис. 5. Сили, що діють на виток

Якщо при формуванні циліндричної канавки з кутом підйому $\omega = 0$ осьові складові сил різьбоформування $P_{oc.v.}$ і $P_{oc.n.}$, що діють на протилежні грані канавки (верхню і нижню на рис. 6) взаємно врівноважуються, то при $\omega \neq 0$ рівновага $P_{oc.v.}$ і $P_{oc.n.}$ порушується (рис. 7). При повороті формуючого гвинта на кут φ_i деформуючий виток вдавлюється в матеріал деталі на величину dr в радіальному напрямку з силою різьбоформування $dP_{piz.}$. При цьому, положення грані профілю зміщується, завдяки куту підйому різьби, в осьовому напрямку на величину dz , що викликає додатковий тиск на грань профіля, що формується, і збільшення $P_{oc.}$ на величину $dP_{oc.}$. Осьове зміщення грані витка на величину dz і радіальне зміщення вершини профіля на dr викликані обертанням гвинта на кут φ_i внаслідок прикладання крутного моменту і взаємозв'язані таким чином:

$$\frac{dP_{oc.}}{dP_{piz.}} = \tan \omega.$$

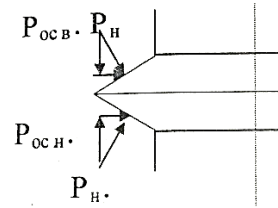


Рис. 6. Схема рівноваги сил в канавці

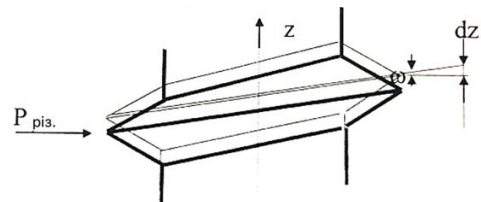


Рис. 7. Схема деформації канавки

Додаткове осьове навантаження $dP_{oc.}$ являє собою некомпенсовану осьову силу, що є наслідком дії на виток сили різьбоформування, і, з огляду на рис. 5 і 6, може бути виражене як:

$$P_{oc.} = P_n \cdot \sin \gamma \cdot \cos \omega \cdot \tan \omega = P_n \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega, \quad (2)$$

де γ – половина кута профіля різьби.

Сили різьбоформування є наслідком дії контактних напружень спротиву металу на грані витка, що деформується, і тому для визначення розрахункових залежностей сил різьбоформування необхідно знати рівень контактних напружень і площу поверхні їх дії.

Як вже зазначалось вище, обчислювати контактні напруження і деформуючі зусилля, повністю визначати поля напружень і швидкостей в перетинах деформуючого металу, дозволяє метод ліній ковзання. Із джерела [2] відомо, що картина полів ліній ковзання для пластичної області, що формується гвинтами з широкою канавкою, відповідає випадку вдавлення ідентора в жорстко-пластичну область (рис. 8). Гвинти, що утворюють різьбу методом пластичного деформування, мають конструктивну особливість-наявність між витками широкої западини, тобто вони є гвинтами з широкою канавкою.

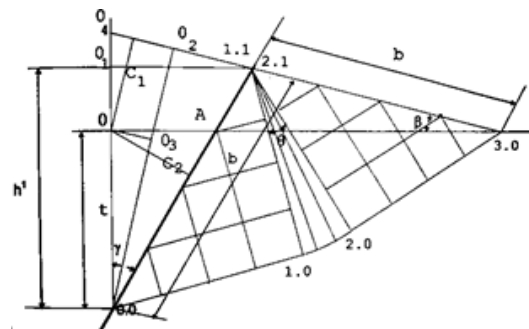


Рис. 8. Поле ліній ковзання для випадку вдавлення гладкого клина в жорстко-пластичну область

Внаслідок симетрії поле ліній ковзання побудоване тільки для однієї сторони гладкого клина. Тут γ – це половина кута клина. Поле характеристик має дві області 0.0-1.0-1.1 і 2.0-2.1-3.0 однорідного напруженого стану і вони об'єднані центрованим віяловим сектором 1.0-1.1-2.0, де ξ – характеристики проведені під кутом 45° до контактної поверхні, а η – характеристики – це дуги кіл з центром 1.1-2.1. Кут розхилу центрованого віяла θ в області 1.0-1.1-2.0.

Авторами було розраховано величину кута розхилу центрованого віяла θ з умови рівності площин трикутників 0-0.0-A і A-1.1,2.1-3.0 (площі канавки і, витісненого витком гвинта, матеріалу) внаслідок нестискаємості матеріалу. Після запису рівності і математичних дій отримано:

$$\cos(\gamma - \beta) = (\sin \gamma + \cos \beta)(\cos \gamma - \sin \beta). \quad (3)$$

Із трикутника A-1.1-3.0 виходить, що $\beta = \gamma - \theta$, тоді:

$$\cos(2\gamma - \theta) = \frac{\cos \theta}{1 + \sin \theta}.$$

Підставивши величину кута профіля витка, отримаємо:

$$\cos(60^\circ - \theta) = \cos 60^\circ \cos \theta + \sin 60^\circ \sin \theta; \quad (4)$$

$$0,5 \cos \theta + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta = 0,5 \frac{1 - \tan^2 \frac{\theta}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\theta}{2}} + \sqrt{3} \frac{\tan \frac{\theta}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\theta}{2}};$$

Після низки подальших перетворень отримаємо:

$$\tan^3 \frac{\theta}{2} + 2(\sqrt{3} - 1.5) \tan^2 \frac{\theta}{2} + 2(1.5 + \sqrt{3}) \tan \frac{\theta}{2} - 1 = 0.$$

Це канонічне рівняння типу:

$$x^3 + rx^2 + sx + t = 0,$$

що перетворюється в рівняння типу:

$$y^2 + py + q = 0. \quad (5)$$

$$p = \frac{3r - r^2}{3}; \quad q = \frac{2r^3}{27} - \frac{rs}{3} + t.$$

По формулі Кардано:

$$y = u + v;$$

$$u = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{D}}; \quad v = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{D}};$$

$$D = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \frac{q^2}{27};$$

$$r = 2(\sqrt{3} - 1.5); \quad s = 2(1.5 - \sqrt{3}).$$

$$p = \frac{6(1.5 + \sqrt{3}) - 4(\sqrt{3} - 1.5)}{3} = 6.4042;$$

$$q = \frac{16(\sqrt{3} - 2.25)^3}{27} - \frac{4(\sqrt{3} - 2.25)}{3} - 1 = 1.9926.$$

$$D = 10.7205; \quad u = 1.6225; \quad v = -1.3165.$$

$$y = u + v = 0.306; \quad x = y - r/3; \quad x = 0.1515.$$

$$x = \tan \frac{\theta}{2}; \quad \frac{\theta}{2} = 8^\circ 36'; \quad \theta = 17^\circ.$$

В реальних умовах пластичне деформування різьби супроводжується також тертям між гвинтом і деталлю, тому вирішення задачі обчислення контактних напружень і деформуючих сил різьбоформування має ґрунтуватись на картині поля ліній ковзання для шорсткого клина, що представлена на рис. 9. Різниця між полями для гладкого клину і шорсткого клину полягає в тому, що лінії ковзання розташовані відносно контактної поверхні не під кутом 45° , а під кутом $(45^\circ + \delta)$, де δ – кут тертя, θ_0 – кут розхилу центрованого віяла для випадку впровадження гладкого клана; θ – кут розхилу центрованого віяла для випадку впровадження шорсткого клину.

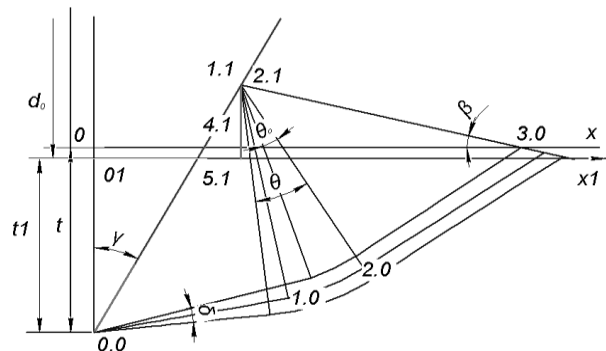


Рис. 9. Поле ліній ковзання для шорсткого клина

Картина ліній ковзання для шорсткого ідентора відмінна від картини ліній ковзання для гладкого тим, що характеристики побудовані з урахуванням кута ковзання δ , тобто:

$$\theta_0 = \theta - \delta = \frac{\pi}{2} - (\gamma + \beta). \quad (6)$$

Залежність (6) визначає величину кута розхилу центрованого віяла θ більшою, ніж для випадку абсолютно гладкого клина, розглянутого раніше θ_0 на величину кута ковзання δ . При цьому кут β чисельно визначиться: $170 = 900 - (600 + \delta)$, він дорівнює 130. Також із збільшенням δ збільшується довжина межі 2.1-3.0, що розширює область 2.1-3.0-2.0, а глибина вдавлювання ідентора, t із збільшенням коефіцієнту ковзання

δ зменшується. Із умови нестискаємості деформуємого металу площа трикутника під віссю X , що видавлюється гвинтом, дорівнює площі витісненого металу над віссю X . Оцінити зменшення глибини вдавлення клина, обумовленого тертям, можна на основі рис. 9.

Величина вдавлення абсолютно гладкого ідентора дорівнює t , а довжина вільної межі – b , тоді як для шорсткого клина величина вдавлення дорівнює t_1 , а довжина вільної межі збільшується до b_1 , при цьому:

$$t - t_1 = (1.1-5.1) - (1.1-4.1);$$

$$1.1-4.1 = b \sin \beta;$$

$$1.1-5.1 = b_1 \sin \beta.$$

В трикутниках 0.0-1.1-1.0 і 1.1-2.0-3.0 сторони, що складають кут розхилу центрованого віяла θ_0 , зберігаються рівними зі зміною кута тертя. Із рівності цих сторін маємо:

$$b_1 = \frac{b \sin(45^\circ + \delta)}{\sin 45^\circ}, \quad (7)$$

$$5.1 - 1.1 = \frac{b \sin(45^\circ + \delta)}{\sin 45^\circ} \sin \beta.$$

$$\begin{aligned} t - t_1 &= \frac{b \sin(45^\circ + \delta)}{\sin 45^\circ} \sin \beta - b \sin \beta = \\ &= \frac{h_1}{\cos \gamma} \sin \beta \left[\frac{b \sin(45^\circ + \delta)}{\sin 45^\circ} \right], \end{aligned} \quad (8)$$

де h_1 – висота підйому профілю від точки 0.0 до точки 2.1, $0 < \delta < 45^\circ$.

По формулі (8) розраховано величину зменшення глибини вдавлення клина, викликаного тертям, $t - t_1$. Для абсолютно гладкого ідентора вона складає $t - t_1 = h_1 \cdot 0$, для цілком шорсткого $t - t_1 = h_1 \cdot 0.107$. Були проведені обчислення глибини вдавлення в безрозмірних величинах для випадків цілком гладкого клину і вдавлення шорсткого клину при різних кутах ковзання. Безрозмірна глибина вдавлення цілком гладкого клину з кутом $\gamma = 300$ склала 0.248, а для цілком шорсткого клину вона склала 0.135 [2]. Різниця становить 0.113, розрахована по формулі (8) становить 0.107. Отже, зміна величини вдавлення клина із залежності від тертя вірно досліджується на основі ліній ковзання.

На підставі поля ліній ковзання (рис. 9) повне зусилля на одиницю довжини клина в нормальному напрямку до контактної поверхні і з урахуванням тертя визначається наступним чином:

$$P = 2kb \left[\frac{\pi}{2} - \gamma + \delta + \frac{\cos \delta}{\cos \gamma} \cos(\gamma - \sigma) \right],$$

де $k = n \cdot n_v \cdot n_H \cdot \sigma_T$ – величина дійсного спротиву деформації;

n – коефіцієнт виду деформованого стану, що для дво-мірного стану дорівнює 0.57;

n_v – коефіцієнт, що враховує вплив швидкості деформації, для невеликих швидкостей дорівнює 1;

n_H – коефіцієнт наклепу, що розрахований по формулі [4]:

$$n_H = \frac{\sigma_B}{\sigma_T} \cdot \frac{1}{1 - \psi} \left(\frac{\psi}{\psi_{us}} \right)^{\frac{\psi}{1 - \psi_{us}}}, \quad (10)$$

де σ_B – межа міцності;

σ_T – межа текучості при розтягненні;

ψ_{us} – відносне звуження в момент утворення шийки при дослідженні стандартних зразків на розрив;

ψ – середня степінь деформації в процесі, для різби дорівнює 0.43;

b – довжина контактної ділянки деформуючої грані витка.

При внутрішньому різбоформуванні деформуюче зусилля створюється вдавленням у метал витка західної частини гвинта. Фізичною моделлю цього процесу є вдавлення жорсткого клину в жорстко-пластичну область. Сила P , що створюється клином, визначається добутком питомої сили різбоформування і довжини контактної прямої. При призначенні режимів різбоформування необхідно прагнути до того, щоб стискуючі залишкові напруження були не тільки більші, але і мали якомога повну епюру по товщині поверхневого шару, рівній глибині нерозповсюдженого дефекту. А оскільки максимальне значення стискуючих залишкових напружень знаходиться на глибині, пропорційній величині прикладеного зусилля, то накатування різби виконують за один оберт. Тобто, з цієї точки зору, внутрішню різбу краще накатувати не конічною західною частиною, а одним повним західним витком або його частиною.

На рис. 10 зображено геометрію західного витка, де змінна довжина контактної ділянки представлено відрізком RP . Сума всіх відрізків RP при переміщенні радіусу-вектору OP по колу складає площу контакту західного витка з деталлю. На рис. 10: ϕ – кут деформуючого сектора, ρ – радіус-вектор, який виражений функцією ϕ із рівняння кривої.

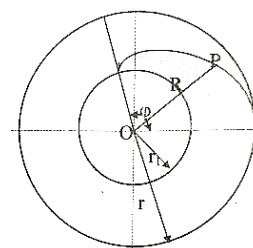


Рис. 10. Контактна площа

Візьмемо спіраль Архімеда, для якої рівняння кривої $\rho = a \cdot \phi$. Згідно рис. 10 площа, обмежена спіраллю Архімеда, з урахування того, що контактна лінія

лежить на грані витка трикутного профіля з кутом 2γ (на рис. зображено радіальний переріз), дорівнює:

$$S = \frac{1}{2} \int_0^\varphi \left(\frac{r-r_1}{\varphi \cos \gamma} \right)^2 \varphi^2 d\varphi + \int_0^\varphi \left(\frac{r-r_1}{\varphi \cos \gamma} \right) \varphi \cdot r_1 d\varphi. \quad (11)$$

Некомпенсована осьова сила різьбоформування, виникнення якої викликає появу поверхневих дефектів і релаксацію корисних стискуючих залишкових напружень, з урахуванням (2), (9) і (11), може бути розрахована за залежністю:

$$P_{oc.} = 2k \left[\frac{1}{2} \int_0^\varphi \left(\frac{r-r_1}{\varphi \cos \gamma} \right)^2 \varphi^2 d\varphi + \int_0^\varphi \left(\frac{r-r_1}{\varphi \cos \gamma} \right) \varphi r_1 d\varphi \frac{\pi}{2} - \gamma + \delta + \frac{\cos \delta}{\cos \gamma} \cos(\gamma - \sigma) \right] \sin \gamma \cos \omega. \quad (12)$$

Розрахунки осьової сили різьбоформування здійснені для різьбоформуючих гвинтів з широкою канавкою діаметрами 2.5...8 мм з урахуванням коефіцієнту тертя, що обирався для $\delta = 0...45^\circ$ і з урахуванням характеристик міцності матеріалу деталі. Матеріали, що найбільше застосовують у з'єднаннях з деформуючими гвинтами, це Д1, Д16, сталь 5, сталь 20 з межею текучості при розтягненні відповідно $\sigma_T = 50$ МПа, 110 МПа, 210 МПа, 250 МПа. Результати розрахунків приведені в таблиці 1.

Розрахунок проводився для кута відновлення висоти профіля витка гвинта φ , що дорівнює 90° , 180° , 360° . На рис. 11 зображена західна частина гвинта і формуючий клин в перетині ОА, що має перемінну контактну довжину b . Формуючий клин 1 набирає повну висоту за частину повного оберту гвинта, а формуючий клин 2 відновлює висоту за повний оберт, тоді як гвинти із забірним конусом набирають висоту за кілька обертів.

Таблиця 1. Результати розрахунку осьової компенсуючої сили

$d = 6.0; d_1 = 4.2$ (мм)				
$S (\varphi = 90^\circ) 1.802$ (мм ²)				
$\sigma_T 50$ (МПа)		σ_H (МПа)	$P_{oc.}$ (Н)	$M_{кр.}$ (Нм)
δ	0	388.04	47.15	0
	0.087	385.76	54.27	0.39
	0.122	383.59	56.95	0.55
	0.175	379.01	60.78	0.78
	0.262	367.99	66.58	1.16
	0.524	313.23	78.83	2.123
	0.785	238.41	82.78	2.80
$d = 6.0; d_1 = 4.2$ (мм)				
$S (\varphi = 360^\circ) 7.2$ (мм ²)				
$\sigma_T 50$ (МПа)		σ_H (МПа)	$P_{oc.}$ (Н)	$M_{кр.}$ (Нм)
δ	0	15552.15	188.62	0
	0.087	1543.06	217.08	1.585
	0.122	1534.37	227.62	2.212
	0.175	1516.06	243.14	3.138
	0.262	1471.97	266.32	4.631
	0.524	1252.90	315.31	8.493
	0.785	953.65	331.13	11.196
$d = 6.0; d_1 = 4.2$ (мм)				
$S (\varphi = 180^\circ) 3.86$ (мм ²)				
$\sigma_T 250$ (МПа)		σ_H (МПа)	$P_{oc.}$ (Н)	$M_{кр.}$ (Нм)
δ	0	1810.84	220.03	0
	0.087	1800.24	253.26	1.890
	0.122	1790.10	265.80	2.638
	0.175	1768.73	283.66	3.742
	0.262	1717.30	310.71	5.522
	0.524	1461.72	367.86	10.127
	0.785	1112.60	386.32	13.351

$d = 6.0; d_1 = 4.2$ (мм)				
$S (\varphi = 180^\circ) 3.860$ (мм ²)				
$\sigma_T 50$ (МПа)		σ_H (МПа)	$P_{oc.}$ (Н)	$M_{кр.}$ (Нм)
δ	0	776.076	94.301	0
	0.087	771.530	108.540	0.792
	0.122	767.187	113.911	1.106
	0.175	758.029	121.570	1.569
	0.262	735.984	133.159	2.315
	0.524	626.451	157.765	4.246
	0.785	476.827	165.567	5.598
$d = 6.0; d_1 = 4.2$ (мм)				
$S (\varphi = 90^\circ) 1.802$ (мм ²)				
$\sigma_T 250$ (МПа)		σ_H (МПа)	$P_{oc.}$ (Н)	$M_{кр.}$ (Нм)
δ	0	905.42	110.018	0
	0.087	900.12	126.630	0.945
	0.122	895.05	132.896	1.319
	0.175	884.37	141.831	1.871
	0.262	858.65	155.352	2.761
	0.524	730.86	183.931	5.064
	0.785	556.30	193.161	6.676
$d = 6.0; d_1 = 4.2$ (мм)				
$S (\varphi = 360^\circ) 7.21$ (мм ²)				
$\sigma_T 250$ (МПа)		σ_H (МПа)	$P_{oc.}$ (Н)	$M_{кр.}$ (Нм)
δ	0	3621.69	440.07	0
	0.087	3600.47	506.52	3.780
	0.122	3580.21	531.58	5.275
	0.175	3537.47	567.33	7.485
	0.262	3434.59	621.41	11.043
	0.524	2923.44	735.72	20.254
	0.785	2225.19	772.64	26.702

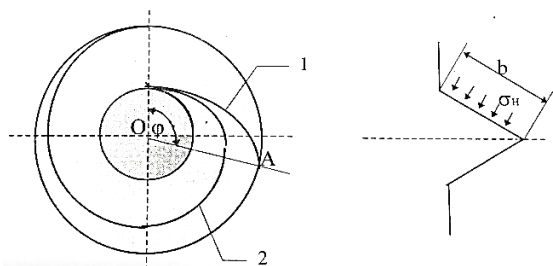


Рис. 11. Західна частина витка

Товщина зміцненого поверхневого шару розраховується як:

$$t = \sqrt{\frac{P_y}{2\sigma_r}}, \quad (13)$$

де t – товщина зміцненого шару;

P_y – зусилля деформування;

σ_r – межа текучості матеріалу.

Оскільки товщина зміцненого шару визначає глибину залягання мікротріщини і його зменшення призводить до того, що тріщина виходить на поверхню, то накатування різьб рекомендується проводити з прикладанням зразу всього зусилля деформування, а не поступово, бо останнє супроводжується калібруванням і збільшенням міцності в тонкому поверхневому шарі.

Висота підйому витка 1 за оберт на кут φ (рис. 11) набагато більша і довжина контактної лінії b більше, ніж у витка 2. Це означає, що деформація витка 1 на куті φ вище і більшим є деформуюче зусилля. Зазвичай різьбоформуючі гвинти конструктивно заради покращення умов базування і плавності врізання виготовляють із забірним конусом. При забезпеченні надійного базування, або для самосвердильних гвинтів, виходячи із вищезазначених міркувань, можна рекомендувати формування профілю за 0.5 або 0.25 оберту.

Представлені в таблиці параметри різьбоформування застосовані в дослідженні впливу осьової некомпенсованої сили, що викликає зворотній рух матеріалу і цим нейтралізує позитивний ефект пластичного деформування, утворює поверхневі дефекти і це знижує циклічну довговічність різьби, утвореної пластичним деформуванням. Про зворотній рух матеріалу свідчить несиметричність сформованого профілю різьби. Дослідження проводилось на зразках матеріалу сталь 20 ($\sigma_s = 240$ МПа, $\sigma_T = 250$ МПа), також був обраний найбільш популярний типорозмір гвинта М6. З'єднання такого типу відносяться до нероз'ємних з'єднань, тому дослідження проводились на зразках, утворених із двох частин. Різьбоформування проводилось послідовно з постійним осьовим навантаженням, адекватним 100 Н, 150 Н, 200 Н, 250 Н, 300 Н, 350 Н, 400 Н. Результати дослідження представлені на фотографіях перерізу профілю другого витка сформованої різьби (рис. 12, 100-разове збільшення).

Фотографії розташовані у послідовності збільшення осьового навантаження. Ця послідовність показує закономірність зміни в параметрах профілю сформованої різьби у випадках недостатнього або надлишкового навантаження. Профіль, найближчий до симетричного був отриманий при формуванні з осьовим навантаженням 300 Н.

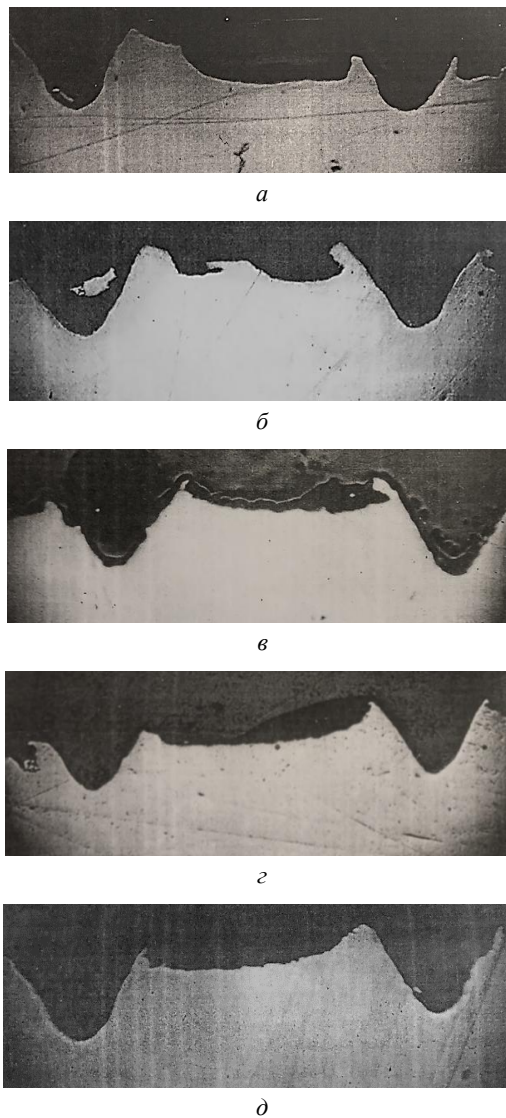


Рис. 12. Профіль другого витка сформованої різьби (100-разове збільшення): а) навантаження 100 Н; б) навантаження 200 Н; в) навантаження 300 Н; г) навантаження 350 Н; д) навантаження 400 Н

На рис. 13 представлені фотографії мікрошліфів осьового перетину сформованої різьби, що отримана самоподачею (рис. 13 а), а також із застосуванням компенсуючої осьової сили (рис. 13 б). На першій фотографії помітна асиметрія другого витка як в параметрах кратеру, так і самої канавки. На другій фотографії профіль виступів близький до трапецеїдального і канавка також не розтягнута некомпенсованою силою.

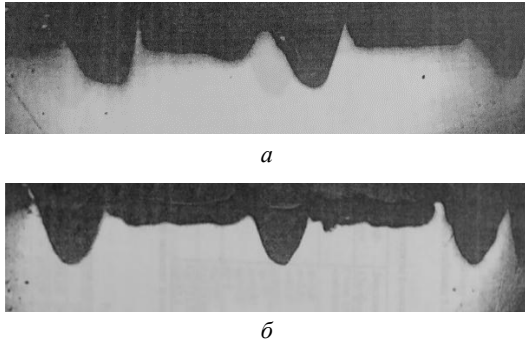


Рис. 13. Профіль осевого перетину різьби (50-разове збільшення): *а*) отримана самопіддачею, *б*) отримана із раціональним навантаженням

Іншим параметром різьбоформування є крутий момент, який можна визначити як суму моментів відносно осі гвинта:

$$M_{кр.} = \int_{r_1}^r \tau \cdot 2\pi \cdot \cos \omega R dR, \quad (14)$$

де R – проміжне значення радіусу;

r_1, r – параметри різьби згідно рис. 11;

τ – дотичне напруження контактної поверхні в зоні різьбоформування (визначається законом Кулона)

$\tau = f \cdot \sigma_H = \sigma_H \tan \delta$; де δ – кут ковзання.

Висновки

На основі положень теорії пластичності установлені закономірності, що описують процеси течії металу в зоні найбільших деформацій під дією осьо-

вої і радіальної сил різьбоформування. На основі вирішення задачі теорії пластичності про вдавлення ідентора в жорстко-пластичну область отримані аналітичні залежності для розрахунку технологічних параметрів різьбоформування. На основі аналізу жорстко-пластичної зони в області найбільших деформацій встановлені закономірності впливу осевої сили різьбоформування на параметри отриманого профілю.

Результати роботи дозволять підвищити якість з'єднання з різьбоформуючою кріпильною деталлю за рахунок уведення в процес різьбоформування компенсуючого осевого навантаження. Забезпечення правильного гвинтового руху при утворенні різьби запобігає зворотньому руху металу, виникненню поверхневих дефектів і релаксації корисних стискаючих напружень, що підвищує циклічну довговічність різьби. А формування симетричного профілю збільшує міцність з'єднання і покращує його стопорні якості. На основі аналізу закономірностей формування поверхневого шару, обґрунтований вибір кута підйому західного витка.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що вони не мають жодного конфлікту інтересів щодо цього дослідження, включаючи фінансові, особисті, авторські або будь-якого іншого характеру, які могли б вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні даної роботи.

References

- [1] B. V. Kopei, V. V. Mykhailiuk, O. R. Martynets and Yu. Ya. Bublinskyi, "The influence of manufacturing technology on the strength of the pump rod thread," *Oil and gas energy*, No. 2, pp. 14–20, 2014.
- [2] L. Danylova, S. Lapkovskyi and V. Prykhodko, "Peculiarities of calculating the diameter of the hole for setting the thread-forming part," *Mech. Adv. Technol.*, Vol. 6, No. 2, pp. 151–160, Oct. 2022, doi: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.2.264828>.
- [3] J. Chakraborty, *Theory of Plasticity*, Elsevier, 3th ed., 2006.
- [4] O. P. Maksymenko and M. K. Izmailova, *Konspekt lektii z dystsypliny "Teoretychni osnovy protsesiv (za fakhom)" Chastyna II, dlia здобувачів вищої першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 136, Metalurhiia za osvithno-profesiinoiu prohramoiu "Metalurhiia"*, Kamianske: DDTU, 2016.
- [5] Q. He, Y. Jiang, X. Jing, Y. Jiang, H. Zhou and B. Fu, "Research and Optimization of Process Parameters for Internal Thread Forming Based on Numerical Simulation and Experimental Analysis", *Materials*, Vol. 15, 3160, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/ma15093160>.
- [6] B. Dodd and K. Osakada, "A note on the types of slip-line field for wedge indentation determined by computer," *Int. J. Mech. Sci.*, 16, pp. 931–938, 1974, doi: [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(74\)90056-3](https://doi.org/10.1016/0020-7403(74)90056-3).
- [7] Mitsutoshi Kuroda, "Plane strain wedge indentation revisited", in *Proc. the Royal Society of London Series A* 478.2262 (2022): 20220204.
- [8] A. O. Lebedev, M. I. Bobyr and V. P. Lamashevskyi, *Mechanics of materials for engineers*, Kyiv: NTUU "KPI", 2006.

- [9] M. S. Mozharovskiy, Theory of elasticity, plasticity and creep: a textbook for students of mechanical and machine-building specialties of higher educational institutions. Kyiv: Vyshcha shkola, 2002. [Online]. Available: <https://discovery.kpi.ua/Record/000135233>.
- [10] V. M. Yavorovskiy, Theory of plastic deformation: methodological instructions for practical classes for students studying under the bachelor's program 6.050502 "Engineering Mechanics" in the specialty "Equipment for pressure processing of metals" Kyiv: NTUU "KPI", 2010. Available: <https://discovery.kpi.ua/Record/000254446>.

The influence of the kinematics of the thread forming process on the quality of the threaded connection

Liudmyla Danylova¹ • Serhii Lapkovsky¹ • Volodymyr Prykhodko¹ • Vasyl Frolov¹

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

Abstract. The effectiveness of assembly operations technologies using threaded parts is determined by the productivity, economy and quality of the resulting connections. The use of thread-forming fasteners in assembly processes reduces labor intensity by eliminating the preliminary thread-cutting operation, and the resulting connections are more accurate and have locking qualities. Thread-forming parts are screwed into smooth holes and form a thread by cutting or deformation. Such connections are called smooth-threaded. In production where the formation of chips is undesirable, thread-extruding screws are used. Threaded connections operate under conditions of alternating loads and for them cyclic durability is an important factor. However, despite the fact that the thread formed by plastic deformation has high strength, the cyclic durability of such a thread is lower than that of a cut thread. Improving the quality of smooth-threaded joints by loading with optimal axial force during thread forming is the topic of this publication.

The reason for the decrease in the fatigue characteristics of rolled threads is the reverse movement of the metal, which is caused by a violation of kinematics during the formation of the thread profile. The purpose of this work is to establish, based on the theory of plasticity, the regularities of the material flow process in the zone of the greatest deformations under the action of axial and radial thread forming forces. By solving the problem of introducing a rigid wedge into the rigid-plastic region, to establish an analytical dependence for calculating the compensating force of thread forming. To experimentally confirm the influence of axial uncompensated force on the quality of smooth-threaded joints.

Deformation in the process of thread forming is characterized by the fact that movement or deformation occurs everywhere in one plane. This is a state of plane deformation. The method of slip lines allows to calculate contact stresses and deforming forces, to determine stress fields in sections of the deformed metal, to analyze local phenomena in solving technological problems. The characteristics of plane plastic deformation make it possible to solve by the graphical method. This method determines the picture of the field of slip lines, its geometric parameters, which establish the relationship between the maximum tangential stress and the deforming force.

Based on the provisions of the theory of plasticity, regularities were established that describe the processes of metal flow in the zone of the greatest deformations under the action of axial and radial thread-forming forces. Based on the solution of the problem of the theory of plasticity on the introduction of the identifier into the rigid-plastic region, analytical dependencies were obtained for calculating the technological parameters of thread-forming. Based on the analysis of the rigid-plastic zone in the region of the greatest deformations, regularities of the influence of the axial thread-forming force on the parameters of the resulting profile were established.

The results of the work will allow to improve the quality of the connection with the thread-forming fastener by introducing a compensating axial load into the thread-forming process. Ensuring the correct screw movement during thread formation prevents the reverse movement of the metal, the occurrence of surface defects and relaxation of useful compressive stresses, which increases the cyclic durability of the thread. And the formation of a symmetrical profile increases the strength of the connection and improves its locking qualities. Analyzing the regularities of the formation of the surface layer, the choice of the angle of rise of the western turn is justified.

Keywords: assembly operation; thread-forming; plastic deformation.