

Особливості розрахунку діаметру отвору для встановлення різьбоформуєчої деталі

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

Received: 14 September 2022 / Accepted: 1 October 2022

Анотація. Ефективність технології визначається сумарним технічним ефектом, одержуваним від їх реалізації. Одним з напрямків поліпшення показників ефективності технології є впровадження складально-різьбоутворюючих процесів, заснованих на застосуванні в конструкціях виробів різьбоутворюючих кріпильних деталей.

Різьбоформуєчі гвинти, шпильки, втулки закручуються в гладкі отвори і самі утворюють різьбовий профіль різанням або деформацією. Зниження трудомісткості досягається усуненням операції попереднього різьбоутворення, а одержані з'єднання мають високі експлуатаційно-технічні показники. У виробництві електронної техніки, приладів, там, де по технічних вимогах небажане утворення стружки, використовують різьбовидавлюючі гвинти. Не дивлячись на переваги самонарізних гвинтів, їх широке застосування стримується за рахунок декількох недоліків: міцність з'єднання за допомогою гвинтів – нижче ніж у з'єднанні за допомогою шпильки чи болта, гвинти зі збільшеним кроком мають незадовільні показники стопоріння, при діаметрі більше 10 мм спостерігається нестабільність крутного моменту і деформація різьбового профіля. Підвищення якості різьбових з'єднань забезпеченням оптимального розміру отвору під різьбоформування є темою цієї публікації. Розрахунок установочого діаметру для різьбоформуєчих деталей з великим кроком має свої особливості і має бути вирішеним з урахуванням тертя, міцності і допуску.

Основними причинами виникнення поверхневих дефектів при монтажі різьбоутворюючих кріпильних деталей є ті, що пов'язані з геометрією - нахатування в заповненому контурі, що призводить до осевого зміщення поверхневих шарів металу. Визначення оптимальної величини діаметру отвору для завічування різьбоформуєчої деталі, з однієї сторони максимально великого, але не більше допустимої величини є метою цієї роботи. Номенклатура різьбоформуєчих кріпильних елементів постійно розширюється, при цьому співвідношення висоти профілю до кроку є величиною змінною навіть в межах одного стандарту. Тому методика розрахунку має бути універсальною з урахуванням умов тертя, міцності, величин допусків.

Процеси різьбоформування описуються як процеси плоскої деформації. Фізично механізм пластичної деформації металів представлений у вигляді зсувів в площинах, де дотичні напруження досягли граничної величини. Для плоскої деформації траєкторії максимальних дотичних напружень в двох ортогональних напрямках описуються лініями ковзання, або характеристиками.

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 при вирішенні технологічних задач. Характеристики плоскої пластичної деформації дозволяють знаходити рішення графічним методом. Використання цього методу дозволяє визначати вигляд поля ліній ковзання, або його геометричні характеристики, які встановлюють залежність між максимальним дотичним напруженням і нормальним гідростатичним тиском, тобто деформуючим зусиллям, а також визначити вигляд і геометричні параметри формуємого профіля, висота якого обмежується допустимою величиною переповнення профіля.

Аналізуючи геометричні параметри зони деформації різьбового витка деталі теоретично обґрунтовано діаметр отвору під різьбоформуєчу кріпильну деталь. Методику цього розрахунку реалізовано у вигляді програмно-математичного забезпечення. Дані рекомендації відносно геометричних параметрів кінцевої частини шурупа-саморіза. Результати роботи дозволяють підвищити якість з'єднання з різьбоформуєчою кріпильною деталлю за рахунок оптимізації діаметру отвору деталі. На основі вирішення задачі теорії пластичності про заглиблення ідентора в жорстко-пластичну область і аналіз пластичної зони в області найбільших деформацій встановлені геометричні параметри і вигляд формуємого профілю. Метод використання ліній ковзання дозволяє розраховувати і аналізувати геометрію візуально, спостерігати зміну форми деформуємого профіля від співвідношення висоти профілю до кроку різьби, матеріалу та коефіцієнта ковзання. Така візуалізація дозволяє обирати величину заповнення профіля навіть більшу за одиницю, коли достатньо велика величина "кратера" різьби не допускає переповнення профіля. Це дає можливість збільшити висоту профіля різьби і площу контакту, а також розширити допуск на отвір в деталі. Як результат маємо підвищення міцності з'єднання і надійності процесу складання.

Ключові слова: складальна операція; різьбоформування; пластичне деформування.

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

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

Вступ

Розвиток сучасного машинобудування визначає необхідність застосування високопродуктивних методів складання. Найбільш поширеним видом з'єднань є різьбові з'єднання, а деталі, що мають різьбу складають близько 60% від загальної кількості деталей. Широка застосовність різьбових з'єднань в різних галузях машинобудування пояснюється їх універсальністю, надійністю, міцністю і технологічністю. Однак такі явища, як нерівномірність розподілу навантаження на різних витках різьби і концентрація напружень у западинах витків впливають на експлуатаційну надійність, стопорні властивості, статичну і динамічну міцність з'єднання [1]. Різьбові з'єднання є найбільш трудомісткими і найважче піддаються автоматизації. Трудомісткість складальної операції визначається типом з'єднання (болтове, гвинтове, шпилькове), від вибору якого залежить кількість деталей, технологічних переходів і виконавчих пристроїв, застосовуваних при виконанні складальної операції. З цієї точки зору технологічним є процес автоматичного з'єднання за допомогою не більш ніж 10-ти виконавчих механізмів. Такому показнику відповідають різьбоформуючі процеси, що ґрунтуються на застосуванні різьбоформуючих кріпильних деталей. Різьбоформуючі гвинти, шпильки, втулки встановлюються в гладкі отвори, що не мають різьби, і самі утворюють різьбу різанням або пластичним деформуванням [2]. Різьбоформуючі шпильки, гвинти, втулки випускаються у відповідності із даними каталогів фірм і кампаній виробників, наприклад Samcar Textron, Elco Construction Products, Atali Associated Co., Fabco Fastening Systems, Concrete Fastening Systems, Hi-Tech Fastener. На такі вироби існують свої стандарти різних країн: DIN 936, 937, TGL 5738, TGL 0-7513, OСТ 23.4.91-76, OСТ 37.001.181-81 - OСТ 37.001.188-81, TGL 34379, TGL 27440, ТУ 67-637-95.

В промисловості і будівництві використовують шурупи-саморізи (Self-Drilling Thread-Forming Screws, рис. 1), ефективність яких визначається усуненням необхідності попереднього свердління отворів в деталях, що з'єднуються, нарізанням, або видавлюванням різьби і точним базуванням гвинта в отворі при різьбоформуванні. Цей метод забезпечує високу продуктивність і якість з'єднання, підвищення статичної і утомної міцності різьби у порівнянні з різьбою, що нарізана.

Суть формування внутрішньої різьби полягає тому, що під дією екструзійного гвинта відбувається пластична деформація заготовки і остаточне утворення різьби. На рис. 2 показана схема заготовки при обробленні різьбоформуючим гвинтом. Коли гвинт обертається в заготовці внутрішня стінка заготовки контактує з першим зубом *A* екструзійного конуса. Оскільки твердість гвинта значно вища твердості заготовки, зуб *A* видавлює вм'ятину на поверхні заготовки. Метал заготовки пластично деформується екструзією зуба *A* і піднімається вздовж обох боків зуба *A*. При обертанні гвинта

зуб *B* входить у поглиблення, видавлене зубом *A*. Завдяки заборному конусу гвинта, висота зуба *B* більше, ніж у зуба *A* і зуб *B* ще більше поглиблює глибину вм'ятини, збільшує ступінь пластичної деформації заготовки та збільшує висоту різьби, що утворюється на обох сторонах вершини зуба *B*. Метал між зубцями *A* і *B* буде мати виступи з обох боків, або "кратер". Коли зуб *C* вдавлюється в заготовку, вм'ятини, залишена зубом *B* збільшується. Коли останній зуб *D* екструзійного конуса видавлюється в заготовку, ступінь пластичної деформації заготовки і кількість металевого матеріалу, видавленого між двома зубами, ще збільшується. У цей момент різьба близька до заданого розміру [3].

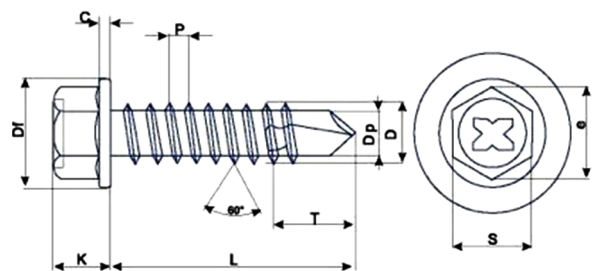


Рис. 1. Шуруп-саморіз. Стандарт (група) – DIN 7504K; Матеріал – сталь цементована загартована; Клас міцності – 560HV; Покриття – цинк білий; Модель (марка) – ТЕХ-Н; Голівка – шестигранна; Вид різьблення – повна; Область застосування – по металу

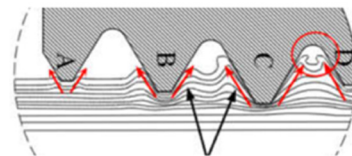


Рис. 2. Схема різьбоутворення пластичним деформуванням [3]

На рис. 3 представлений профіль метричної різьби, отриманої різьбоформуючим гвинтом. Відомо [4], що висота видавленого профілю і ширина "кратеру" залежать від діаметра під різьбу заготовки. На рис. 4 червоними лініями показані межі діаметру під різьбу від мінімального до максимального. Чим більше діаметр отвору тим вище стійкість інструмента (для шурупа-саморіза, який використовується разово, цей параметр не суттєвий), процес різьбоформування легший і надійніший, крутний момент менший, точність різьби зберігається, менша величина зміцнення матеріалу деталі. При цьому висота отриманої різьби менше, що зменшує площу контакту отриманої різьби. Треба оптимізувати величину отвору під різьбу таким чином, він має бути максимально великим, але не більше допустимої величини, інакше можливе заїдання гвинта при різьбоформуванні.

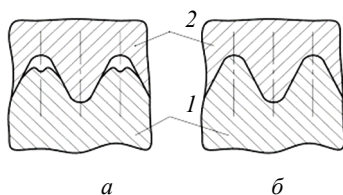


Рис. 3. Профіль метричної різьби, утвореної видавлюванням незаповнений (а) і заповнений (б) контури витків різьби: 1 – профіль сформованої різьби, 2 – витки гвинта [1]

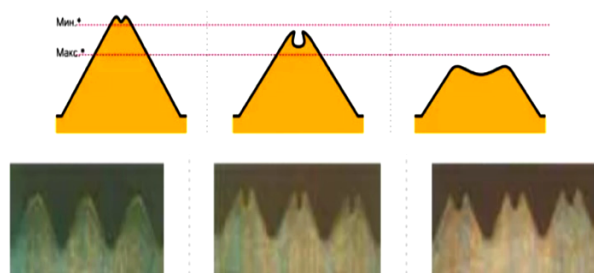


Рис. 4. Залежність профілю різьби від діаметра піднакатування [11]

Діаметр отвору під різьбу традиційно визначають із умови збереження постійності об'ємів до і після пластичної деформації із всілякими уточненнями і обмеженнями, що ураховують умови тертя, міцності, пружне розширення-стискання, згладжування нерівностей, осьову течію металу, величину допусків. Всі ці уточнення необхідні для зменшення вірогідності переповнення профілю витків гвинта. У випадку метричної різьби стандартного профілю з нормальною канавкою діаметр під різьбу визначають із умови не тільки збереження постійності об'ємів до і після деформування, але і умови подібності профілів різьби витка і деталі.

Самонарізаючі та різьбовидавлюючі гвинти різних конструкцій деяких зарубіжних фірм-виробників:

- Farmacell screw (Atali Associated Co.);
- Self-Drilling screws (Atali Associated Co.);
- Tarcon anchor (Elco Construction Products);
- Self-Drilling screws (Hi-Tech Fastener);
- Drill-Flex (Elco construction);
- Thread cutting screws (Hi-Tech Fastener);
- Thread-forming screws for assembling thermoplastics (Camcar Textron) виготовляються як із нормальним так і крупним кроком, або широкою канавкою.

Номенклатура різьбоформуємих кріпильних елементів постійно розширюється, при цьому співвідношення висоти профілю до кроку є величиною змінною навіть в межах одного стандарту [5].

На рис. 5 представлено фотографія профіля, що в результаті експерименту був сформований в деталі шуропом-саморізом (рис. 1) розміром М6 при осьовому навантаженні 300Н.

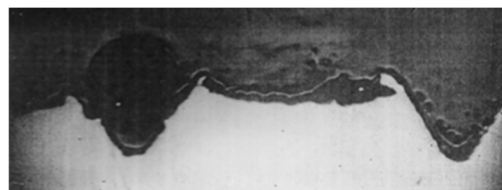


Рис. 5. Профіль другого витка сформованої різьби (100 – кратне збільшення)

Параметри “кратера” на рис. 5 значні, а подібності профілів різьби витка і деталі нема, що унеможливає розрахунок діаметра під формування різьби на основі подібності профілів, хоча умова зберігання постійності об'ємів металу до і після деформації зберігається.

Мета роботи

Монтаж різьбоутворюючих кріпильних деталей має певну специфіку:

- Кріпильний елемент загвинчується в гладкий отвір для гвинта, а в окремих випадках сам попередньо його свердлить;
- Геометрія різьбоутворюючих ділянок кріпильних елементів різноманітна, так само як і принципи формоутворення;
- Процес складання з'єднань супроводжується значними крутними моментами;
- Стопоріння кріпильних-різьбоутворюючих деталей проводиться дією післядеформаційної усадки отворів, в інших випадках затягуванням по спеціальним різьбовим ділянкам з особливим профілем різьби, в інших випадках застосовуються додаткові елементи або деталі на стержнях (гладкі пояски, вставки, шайби і т.д.);
- Початковий момент загвинчування кріпильно-різьбоутворюючих деталей як правило нестійкий, що вимагає особливих умов і засобів орієнтування для суміщення осей;
- Наведені елементи виступаючих частин деталей конструктивно різноманітні (шліци, хрестові пази, шестигранні головки і отвори, різьбові ділянки, рифлення і т.д.);
- Кріпильно-різьбоутворюючі вироби застосовуються в різних типах виробництв – від малосерійного до масового. Це тягне за собою застосування відповідних засобів механізації та автоматизації.

Слід зазначити, що рівень автоматизації і механізації процесу різьбозагвинчування досить низький. Для даного типу виробництва характерне застосування переносних і портативних загвинчуючих пристроїв.

При автоматизованому процесі з'єднання можливе виникнення наступних критичних ситуацій:

- Зрив шліца або паза в голівках;
- Перекося гвинтів вище критичних значень;
- Високі значення крутних моментів;

4. Провертання гвинта (немає затяжки через перевищення d_0 щодо розрахункових значень);
5. Нестійкий стан гвинта в початковий момент з'єднання (вивертання);
6. Коливання крутного моменту при закручуванні;
7. Зріз стержня гвинта;
8. Гвинт не загвинчується (заниження d_0);
9. Не спрацьовує завантажувальний пристрій;
10. Випадання гвинтів з губок пристрою (живильника);
11. Недостатнє затягування гвинта;
12. Коливання висоти профілю;

Основними причинами виникнення поверхневих дефектів є:

1) причини, пов'язані з геометрією – накатування в заповненому контурі, що призводить до осьового зміщення поверхневих шарів металу;

2) пов'язані з кінематикою процесу накатування – неспівпадіння шляхів проходження робочих поверхонь інструмента по поверхні різьби, що накатується.

Перша причина виникнення критичних ситуацій при різьбозавинчуванні і поверхневих дефектів різьби, що призводить до зниження довговічності деталей з різьбою є об'єктом дослідження цієї роботи. Визначення оптимальної величини діаметру отвора для завинчування в нього різьбоформуєчої деталі, з однієї сторони максимально великого, але не більше допустимої величини є метою цієї роботи. Номенклатура різьбоформуєчих кріпильних елементів постійно розширюється, при цьому співвідношення висоти профілю до кроку є величиною змінною навіть в межах одного стандарту. Тому методика розрахунку має бути універсальною з урахуванням умови тертя, міцності, величину допусків.

Методика. Чисельні розрахунки. Результати та їх обговорення

При обертанні гвинта в деталь виступи на гранях витків заборного конуса заглиблюються в метал, утворюючи западини, а витіснений матеріал переміщується по бічним поверхням витків гвинта поступово збільшуючи висоту витка деталі. Деформація в процесі різьбоформування характеризується тим, що рух, або деформація відбуваються в одній площині. Такий стан називають плоскою деформацією. Фізично механізм пластичної деформації металів представлений у вигляді зсувів в площинах, де дотичні напруги досягли граничної величини. Такі зсуви проявляються на поверхні деформуєчих металів у вигляді ліній Людерса в практиці обробки металів тиском [6–8]. Натуральні рисунки на поверхні деформованого металу співпадають з лініями в напрямку яких відсутні деформації розтягнення або стискання. Такі лінії називають лініями ковзання або характеристиками і для плоскої деформації лінії ковзання співпадають з траєкторіями максимальних дотичних напружень в двох ортогона-

льних напрямках. Поле цих траєкторій створює ортогональну сітку із двох систем ліній, дотичні до яких співпадають з напрямками найбільших дотичних напружень. Позначаються лінії ковзання першого і другого сімейств відповідно ξ і η .

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 в вирішенні технологічних задач. Характеристики плоскої пластичної деформації дозволяють знаходити рішення графічним методом. Використання цього метода дозволяє визначити вигляд поля ліній ковзання, або його геометричні характеристики, які встановлюють залежність між максимальним дотичним напруженням і нормальним гідростатичним тиском, тобто деформуючим зусиллям, а також визначити вигляд і геометричні параметри формуємого профіля, висота якого обмежується допустимою величиною переповнення профіля. Вигляд пластичної області, її поле ліній ковзання залежить від схеми пресування, а в нашому випадку від параметрів профіля, що деформує.

Ці параметри визначаються геометрією західної частини гвинтів (або інших різьбоформуєчих деталей) і різьби. Так різьба може бути метричною стандартного профілю або такою, що має широку різьбову канавку. Західна частина різьбової деталі виконується конусною, тоді виток набирає висоту за кілька обертів. Якщо західна частина виконується циліндричною, то висота витка відтворюється за оберт або частину оберту. На рис. 5 зображені поля ліній ковзання, що відповідають цим умовам.

Поле, що показане на рис. 6, а відповідає схемі пресування в клиновому контейнері і вирішенню задачі теорії пластичності о стисканні метала між двома рівними нахиленими плитами. В цьому випадку формуються одночасно обидві грані профілю різьби, що відповідає різьбоформуванню деталі з забірним конусом, коли сусідні виступи конічної частини гвинта заглиблюються в метал і збільшують висоту формуємого витка з обох сторін.

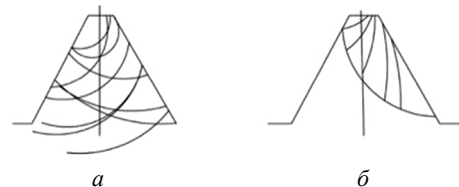


Рис. 6. Зона деформації при формуванні гвинтами двох типів: а) із західним конусом; б) із західним витком

Інша картина полів ліній ковзання відповідає випадку формування профілю витком, який повністю заглиблюється в метал корпусу за один оберт гвинта. В цьому випадку формування профілю проводиться по

черзі і такий процес подібний прошивці плоским клиновим пуансоном.

Розглянуті випадки є характерними для метричної різьби стандартного профілю з нормальною канавкою. Із картин поля ліній ковзання видно, що пластична область розповсюджується на весь переріз витка, тобто має місце інтенсивна течія метала в середній частині профілю. Тому метал заповнює всю канавкову область гвинта і параметри “кратера” порівняно невеликі.

Такі процеси як: пресування (пряме і зворотне), прошивка, волочіння, редукування, що мають однакову область неоднорідної пластичної течії. Формально вони можуть бути описані схемному, що показана на рис. 7.

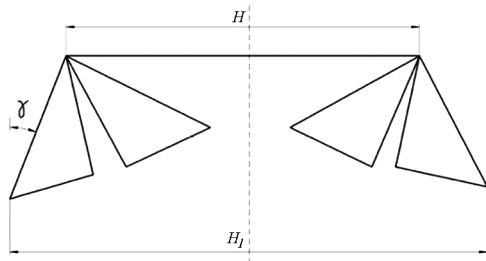


Рис. 7. Типова схема пресування

Основними параметрами цих процесів є:

Обтиснення заготовки $R=H_1/H$, де H і H_1 – товщини заготовки до і після обтиснення; γ – кут нахилу матриці.

Із теорії пластичності відомо, якщо поля ліній ковзання, що належать протилежним нахиленим граням торкаються, тобто пластична деформація охоплює всю область витка, то справедливо співвідношення:

$$R = \frac{H_1}{H} = \frac{1}{1 + 2 \sin \gamma} \quad (1)$$

Стверджується, якщо R не перевищує розраховану по (1) величину, то деформація можлива із умови граничного навантаження при $\gamma < 420271$.

Якщо $\gamma < 420271$, але R перевищує розраховану із умови крайнього навантаження величину, то вирішення має інший вигляд, а саме такий, що відповідає вирішенню задачі про заглиблення ідентора. Для різьби різьбоформуючого гвинта $\gamma = 30$ розраховане значення складає $H_1/H = 1/2$.

Параметри різьби різьбоформуючих гвинтів з широкою канавкою є такими, що співвідношення H_1/H значно перевищує 0,5. Тому картина полів ліній ковзання для пластичної області, що формується гвинтами з широкою канавкою, відповідає випадку упровадження ідентора в жорстко-пластичну область (Рис. 8). Упровадження ідентора в жорстко-пластичну область є прикладом нестационарної течії де має місце геометрична подібність – незалежність форми пластичної області від глибини упровадження ідентора t . Зі збільшення глибини упровадження пластична область тільки збільшується в масштабі без зміни форми.

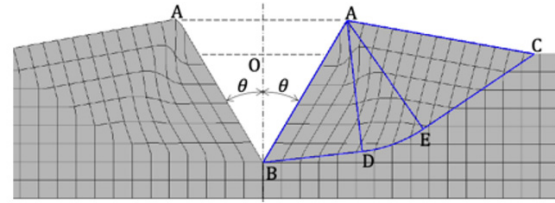


Рис. 8. Поле ліній ковзання для випадка упровадження ідентора в жорстко-пластичну область [4]

Раніше обґрунтовано доцільність вирішення задачі пресування в клиновидному контейнері або стискання між нахиленими стінками для випадків з рис. 6 а, 6 б. Фізичною моделлю, що відповідає формуванню різьби гвинтом із крупним кроком є упровадження жорсткого клину в жорстко-пластичну область. При вирішенні цієї класичної задачі слід додати корекції, що враховують якості реальних матеріалів. Достатня величина “кратера” і можливість обтискання його вершин компенсує можливе переповнення профілю різьби, що дозволяє розширити поле допуску на діаметр отвору під різьбу.

Для вирішення задачі про упровадження жорсткого клина в жорстко-пластичну область треба побудувати поле характеристик [9], рис. 9. Внаслідок симетрії побудови виконані тільки для правої сторони гладкого клина. Кут γ дорівнює половині кута клина. Поле характеристик складається із двох областей 0.0-1.0-1.1 і 2.0-2.1-3.0 з однорідним напруженим станом, що об’єднані центрованим віялом 1.0-1.1-2.0 в якому ξ = характеристики, проведені під кутом 45° до контактної прямої b , а η = характеристики – дуги окружностей з центром 1.1-2.1. Для побудови цього поля треба знати: довжину b контактної межі клина і пластичної області, яка для гладкого клина дорівнює довжині нахиленої вільної межі 2.1-3.0. Кут розхилу центрованого віяла θ в області 1.0-1.1-2.0. Довжина b визначається:

$$b = \frac{h^1}{\cos \gamma'} \quad (2)$$

де h^1 – висота сформованого профіля.

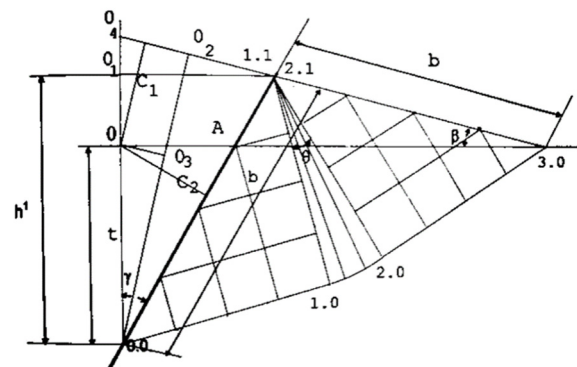


Рис. 9. Поле ліній ковзання для випадка упровадження гладкого клина в жорстко-пластичну область

Тобто визначається глибиною впровадження ідентора t , що спричиняє підйом металу уздовж бічної поверхні ідентора на загальну величину b .

Для цього використовуємо умови:

$$1) \quad \begin{aligned} t &= 0.0 - O_1 - O.O_1, \\ t &= b(\cos \gamma - \sin \beta). \end{aligned} \quad (3)$$

2) рівність площин трикутників $0.0-O-A$ і $A-1.1,2.1-3.0$ внаслідок нестисливості матеріалу.

Із рівності площин цих трикутників:

$$\frac{O_4 - 3.0 \cdot C_1}{2} = \frac{b \cdot C_2}{2} + \frac{O_4 - 1.1 \cdot C_1}{2};$$

$$b = (O_4 - 3.0 - O_4 - 1.1) = C_1 \cdot b.$$

Виникає рівність довжин перпендикулярів C_1 і C_2 , що опущені із точки O на основи довжиною b

$$C_2 = 0.0 - O_2 - 0.0 - O_3,$$

$$t \sin \gamma = b \cos(\gamma - \beta) - t \cos \beta. \quad (4)$$

Виключаючи t і b із (2) і (3), якщо $t = b(\cos \gamma - \sin \beta)$, отримаємо

$$b \sin \gamma (\cos \gamma - \sin \beta) = b \cos(\gamma - \beta) - \cos b \cdot b(\cos \gamma - \sin \beta),$$

$$\cos(\gamma - \beta) = (\sin \gamma + \cos \beta) \cdot (\cos \gamma - \sin \beta), \quad (5)$$

що визначає кут β .

Із рис. 8 і трикутника $A-1.1-3.0$ слідує, що $\beta = \gamma - \theta$ і тому залежність (5) може записати в вигляді

$$\cos(2\gamma - \theta) = \frac{\cos \theta}{1 + \sin \theta}. \quad (6)$$

Необхідні для отримання θ розрахунки були проведені і розрахована величина складає $\theta = 17^\circ$. Так як θ і β не залежать від t , то форма поля характеристик залишається незмінною рівномірно розширюючись по мірі впровадження ідентора. Ця властивість подоби дозволяє легко визначити висоту підйому металу $(h^1 - t)$ і глибину впровадження t в залежності від необхідної висоти формує мого профілю h^1 . Однак, виток різьби має форму не циліндричну, а спіральну. Вершина клину різьби гвинта знаходиться на зовнішньому діаметрі гвинта, тоді як вершина формуємого профілю знаходиться на внутрішньому діаметрі. Виходячи із цього, об'єм металу, що витісняється клином із області під лінією $O-3.0$, не рівний об'єму сформованої області над лінією $O-3.0$, що порушує умову рівності площин трикутників $O-0.0-A$ і $A-1.1,2.1-3.0$. Тому лінія $O-3.0$ зміщується від центру до осі гвинта і займає положення $O_2-3.2$, визначаючи зараз значення d_0 (рис. 10). Так як трапеція $O-O_1-1.1-A$ є загальною для трикутника $0.0-0_1-1.1$ і трапеції $O-O_1-1.1-3.1$, то зручно порівнювати об'єми, отримані обертанням цих фігур навколо осі гвинта, а для зручності представимо їх сумою кількох простіших форм.

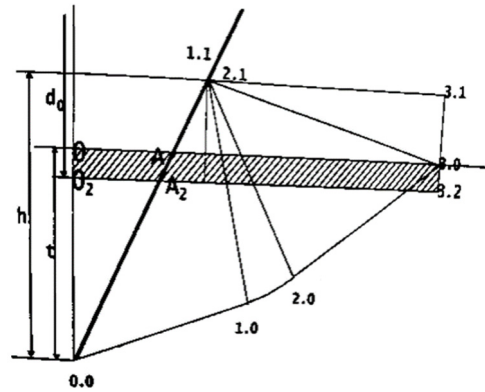


Рис. 10. Схема для визначення корекції на циліндричність

$$V_{(O_1-0.0-1.1)} = V_{(O_1-O_2-3.2-3.1)} - V_{(2.1-3.0-3.1)}. \quad (7)$$

Необхідні перетворення були проведені і результат наступний:

$$d_0 = \frac{\frac{1}{3}(r-h)\cos\beta + \sqrt{\left[\frac{1}{2}(r-h)\cos\beta\right]^2 + 4\left(\frac{1}{2} + \frac{2}{3}\cos\beta\right)}}{-\frac{1}{3}\left[r^2\left(\cos\beta - \frac{2}{3}\right) + rh\left(\frac{3}{2} - 2\cos\beta\right) - h^2\left(\frac{1}{2} + \cos\beta\right)\right]} \cdot \frac{1}{4\left(\frac{1}{2} + \frac{2}{3}\cos\beta\right)}. \quad (8)$$

Розраховані значення діаметру під накатування різьби d_0 для гвинтів по ГОСТ 10618-80 – ГОСТ 1061-80 і ГОСТ 11650-80 – ГОСТ 11652-80 знаходяться в таблиці 1.

Оцінимо величину корекції $\Delta t = OO_2$, тобто значення зміщення лінії $O-3.0$ до лінії $O_2-3.2$. Для цього розглянемо об'єми чотирьох фігур (рис. 8):

- V_1 – об'єм тіла, що описаний трикутником $O-0.1-A$;
- V_2 – об'єм тіла, що описаний трикутником $A-1.1-3.0$;
- V_3 – об'єм тіла, що описаний трапецією $O-O_2-A_2-A$;
- V_4 – об'єм тіла, що описаний трапецією $A-A_2-3.2-3.0$.

По теоремі Гульдена об'єм тіла, що описаний плоскою фігурою при обертанні її навколо осі, що лежить в площині цієї фігури і не перетинає її, рівний добутку площі цієї фігури на довжину окружності, що описана при обертанні центра ваги цієї фігури.

$$V_1 = \frac{1}{2} \pi t^2 \operatorname{tg} \gamma \left(\frac{d}{2} - t + \frac{t}{3} \right), \quad (9)$$

$$V_{12} = \frac{1}{2} \pi t^2 \operatorname{tg} \gamma \left(\frac{d}{2} - t - \frac{h-t}{3} \right), \quad (10)$$

$$V_3 + V_4 = \left[t \cdot \operatorname{tg} \gamma + (h-t) \left(\operatorname{tg} \gamma + \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma} \right) \right] \left(\frac{d}{2} - t + \frac{\Delta t}{2} \right) \pi, \quad (11)$$

Таблиця 1. Параметри розрахунку діаметру отвору під накатування різьби різьбоформуючими гвинтами [10]

d	d_1	h	t	d_0	Δt ($\delta = 15^\circ$)	Δt ($\delta = 30^\circ$)	Δt ($\delta = 45^\circ$)
2,5	1,7	0,4	0,30	1,92	0,0233	0,0814	0,2064
2,5	2	0,25	0,19	2,13	0,0145	0,0175	0,2295
3	2,1	0,45	0,33	2,34	0,0262	0,0316	0,2522
3	2,3	0,35	0,26	2,49	0,0204	0,0246	0,2673
4	2,8	0,6	0,44	3,13	0,0349	0,0422	0,3363
4	2,9	0,55	0,41	3,20	0,0320	0,0387	0,3440
5	3,5	0,75	0,56	3,91	0,0437	0,0527	0,4204
5	3,9	0,55	0,41	4,19	0,0320	0,0387	0,4514
6	4,2	0,9	0,67	4,69	0,0524	0,0633	0,5045
6	4,9	0,55	0,41	5,19	0,0320	0,0387	0,5588
7	3,6	2,2	1,63	4,87	0,1282	0,1548	0,5237
7	6,2	0,9	0,67	6,68	0,0524	0,0633	0,7191

$$V_1 - V_3 = V_2 + V_4 \text{ або } V_1 - V_2 = V_3 + V_4.$$

$$t^2 \operatorname{tg} \gamma \left(\frac{d-2t}{2} + \frac{t}{3} - \frac{d-2t}{2} + \frac{h-t}{3} \right) = \left[t \cdot \operatorname{tg} \gamma + (h-t) \left(\operatorname{tg} \gamma + \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma} \right) \right] \left(\frac{d}{2} - t + \frac{\Delta t}{2} \right), \quad (12)$$

$$t^2 \operatorname{tg} \gamma \frac{h}{3} = \left[t + (h-t) \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \beta} \right) \right] (d-2t + \Delta t) \Delta t. \quad (13)$$

Із (3) $t = b(\cos \gamma - \sin \beta) = h \left(1 - \frac{\sin \beta}{\cos \beta} \right).$

$$\frac{t^2}{3} \cdot \frac{t}{\left(1 - \frac{\sin \beta}{\cos \beta} \right)} = t \left[1 + \left(\frac{1}{1 - \frac{\sin \gamma}{\cos \gamma}} - 1 \right) \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \beta} \right) \right] \times (d-2t + \Delta t) \Delta t,$$

$$\frac{t^2}{3} = \left[1 - \frac{\sin \beta}{\cos \gamma} + \frac{\sin \beta}{\cos \gamma} \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \beta} \right) \right] (d-2t + \Delta t) \Delta t,$$

$$\frac{t^2}{3} = \left[1 - \frac{\sin \beta}{\cos \gamma} + \frac{\sin \beta (\operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \beta + 1)}{\cos \gamma \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg} \gamma} \right] (d-2t + \Delta t) \Delta t,$$

$$\frac{t^2}{3} = \left[1 - \frac{\sin \beta}{\cos \gamma} + \frac{\cos \beta (\operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \beta + 1)}{\sin \gamma} \right] (d-2t + \Delta t) \Delta t,$$

$$\frac{t^2}{3} = \left[1 - \frac{\sin \beta}{\cos \gamma} + \frac{\cos \beta}{\sin \gamma} + \frac{\sin \beta}{\cos \gamma} \right] (d-2t + \Delta t) \Delta t,$$

$$\frac{t^2}{3} = \left[1 + \frac{\cos \beta}{\sin \gamma} \right] (d-2t + \Delta t) \Delta t,$$

$$\Delta t^2 + (d-2t) \Delta t - \frac{t^2}{3(1+2 \cos \beta)} = 0,$$

$$\Delta t = \frac{-(d-2t) + \sqrt{(d-2t)^2 + \frac{4t^2}{3(1+2 \cos \beta)}}}{2}, \quad (14)$$

$$\frac{d-2t}{2} + \Delta t = \sqrt{(d-2t)^2 + \frac{4t^2}{3(1+2 \cos \beta)}}. \quad (15)$$

Величина $\frac{d-2t}{2}$ представляє собою радіус

отвору під подальше накатування і залежить від зовнішнього діаметра гвинта і глибини впровадження призматичного ідентора в напівплощину, величина якої легко визначається чисельно в залежності від бажаної висоти формуємого профілю h' чи береться безпосередньо з креслення жорстко-пластичної області.

Залежність (15) для визначення діаметра під подальше накатування отримана з властивості подібності пластичної області в зоні деформації, і має простий вигляд. Через мізерно малу величину Δt (див. Таблицю 1) нею можна знехтувати і визначити d_0 із умови рівності площ впровадження клина і перетину сформованого витка, тобто безпосередньо, користуючись кресленням ліній ковзання.

Вирішення для випадка впровадження ідентора з шорсткими гранями відмінно тим, що на схемі характеристик лінії ковзання наближуються до контактної поверхні, нахиленої до осі X під кутом $\gamma = 30^\circ$, не під 45° , а під кутом $(45^\circ + \delta)$ (рис. 11).

Вирішення для шорсткого ідентора відмінно від гладкого тим, що лінії ковзання побудовані з урахуванням кута ковзання δ , тобто:

$$\theta_0 = \theta - \delta = \frac{\pi}{2} - (\gamma + \beta). \quad (16)$$

Залежність (16) визначає кут розхилу θ більшим, ніж для випадку абсолютно гладкого штампа, розглянутого раніше θ_0 на величину кута ковзання δ . При цьому кут β численно визначиться: $17^\circ = 90^\circ - (60^\circ + \delta)$, рівним 13° .

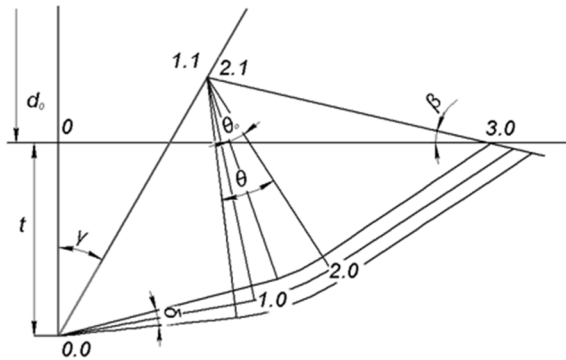


Рис. 11. Поле ліній ковзання для шорсткого клина

На рис. 10 видно що із збільшенням δ збільшується довжина вільної межі 2.1-3.0, що приводить до розширення області 2.1-3.0-2.0. При цьому глибина впровадження ідентора t із збільшенням коефіцієнта ковзання δ зменшується. Згідно із теорією В. В. Соколовського кути θ_0 і β не залежать від δ . Із умова несжимаемості матеріала площа трикутника під віссю X , що видавлюється гвинтом, дорівнює площі над віссю X , що утворена витисненим матеріалом. Оцінки величини зменшення глибини впровадження клина, обумовленого тертям, здійснюється на основі рис. 12.

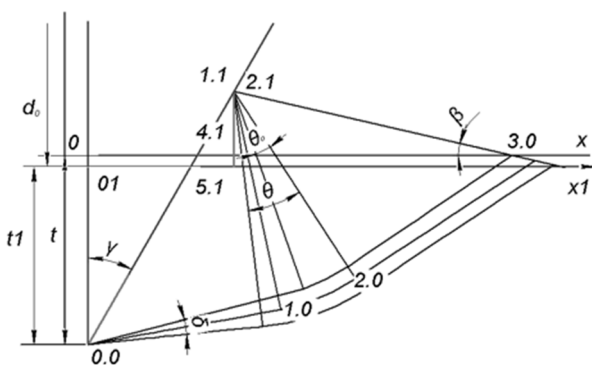


Рис. 12. Схема для визначення корекції діаметру під накатування різьби на величину тертя

Для абсолютно гладкого ідентора величина заглиблення – t , а довжина вільної межі – b . Для шорсткого клина величина заглиблення – 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, розташовані під кутом θ_0 одна до одної, рівні між собою і ця рівність зберігається зі зміною кута тертя θ . Із рівності цих сторін маємо:

$$b_1 = \frac{b \sin(45^\circ + \delta)}{\sin 45^\circ}, \quad (17)$$

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

$$t - t_1 = \frac{b \sin(45^\circ + \delta)}{\sin 45^\circ} \sin \beta - b \sin \beta =$$

$$= \frac{h'}{\cos \gamma} \sin \beta \left[\frac{b \sin(45^\circ + \delta)}{\sin 45^\circ} - 1 \right], \quad 0 < \delta < 45^\circ. \quad (18)$$

Розрахована величина $t - t_1$ по цій формулі для абсолютно гладкого ідентора: $t - t_1 = h_1 0$, для цілком шорсткого $t - t_1 = h_1 0.107$.

де h_1 – висота підйому профілю від точки 0.0 до точки 2.1.

Р. Мізесом були проведені обчислення в безрозмірних змінних з характерною довжиною для різних кутів для цілком гладкого і шорсткого клина. Безрозмірна глибина впровадження клина з кутом $\gamma = 30^\circ$ при цілком гладкому клині склала 0,248, а при цілком шорсткому клині склала 0,135. Різниця, обчислена Р. Мізесом становить 0,113. Обчислена на підставі аналізу геометрії зони деформації, становить 0,107. Це підтверджує вірність визначеного нами характеру зміни величини впровадження клина при зміні умов тертя.

Отримана раніше залежність для визначення величини d_0 по формулі (8) має бути скорегована на величину $2(t - t_1)$, яка враховує коефіцієнт тертя на контактній поверхні, що залежить від матеріалу корпусу, гвинта або його покриття.

Мінімальний діаметр під різьбоформування обмежується можливістю переповнення профілю різьби, а максимальний – коефіцієнтом стопоріння різьби (0,6–0,9) і він тим більше, чим більше відношення висоти сформованого профілю до висоти різьби деформуючої деталі. Профіль різьби, що формується саморізами, має форму “кратера”. Можливе осадження його вершин дозволяє збільшити коефіцієнт заповнення профілю без його переповнення. Параметри “кратера” або вигляд пластичної області будується на базі методу ліній ковзання для обраних параметрів різьби гвинта, коефіцієнта заповнення профіля і коефіцієнта тертя в середовищі розробленого програмного забезпечення.

За заданими параметрами будується поле ліній ковзання без урахування тертя і з його врахуванням, а також розраховується діаметр під різьбу з урахуванням

корекції на циліндричність. Об'єднання побудованих полів ліній ковзання і заданих параметрів різьби деталі дає уявлення про картину деформації, розміри “кратера” і можливості переповнення профілю, а також про оцінки допуску на отвір під різьбоформування в деталі (рис. 13).

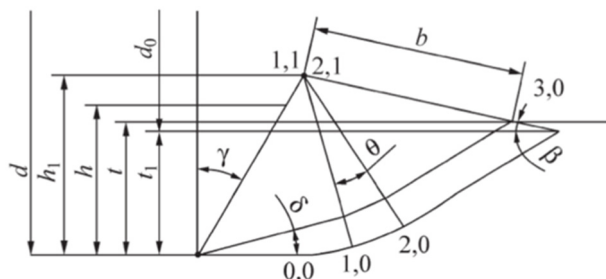


Рис. 13. Схема для визначення діаметру під різьбоформування: γ – кут, рівний половині кута витка; θ – кут розхилу центрованого віяла для абсолютно гладкого клину; β – кут підйому метала $\theta - \delta = 90^\circ - (\gamma + \beta)$; b – межа контакту клину з пластичною областю 3; t – необхідна глибина упровадження гладкого клину; t_1 – необхідна глибина упровадження шорсткого клину; h – висота профіля різьби; h_1 – висота сформованого профіля; d – зовнішній діаметр різьби гвинта; d_0 – діаметр під різьбоформування

Розглянемо, як змінюється розрахований діаметр під різьбу при зміні коефіцієнта заповнення профілю, наприклад для гвинта М8. За ГОСТ 10618-80 - ГОСТ 10621-80 і ГОСТ 11650-80 - ГОСТ 11652-80 зовнішній і внутрішній діаметри різьби гвинта дорівнюють $d = 8$ мм, $d_1 = 3,6$ мм, $h = 2,2$ мм і $d = 8$ мм, $d_1 = 6,2$ мм, $h = 0,9$ мм.

Профіль перерізу з внутрішнім діаметром 3,6 мм має відносно невеликий крок, тому заповнення про-

філю слід вибирати рівним 0,8 або 0,9. Розрахунковий діаметр під наступне накочування при заповненні профілю 0,8; 0,9 та 1 становить 5,536 мм; 5,258 мм; 4,992 мм. Як видно, діаметр під накочування без загрози переповнення профілю різьблення знаходиться в межах 4,99...5,53 мм.

У гвинта М8 з $d_1 = 6,2$ мм профіль різьби має широкую канавку і, отже, велику площу “кратера” різьби, яка може бути заповнена при осадці його вершин, підвищуючи міцність сформовані різьби. Тому коефіцієнт заповнення профілю можна призначити рівним 1 або 1,2, при цьому розрахунковий діаметр під різьбоформування дорівнює 6,698 або 6,446 мм без загрози переповнення профілю різьби. Для цього типорозміру гвинта можна виконувати отвір під різьбу діаметром $6,4 + 0,25$ мм при традиційно прийнятому $7,1 + 0,07$ мм.

Метод експрес розрахунку дозволяє збільшити міцність різьби за рахунок підвищення натягу або переповнення профілю, а також значно збільшити допуск на отвір під різьбу.

Висновки

Методика визначення d_0 під накатування деформуючими гвинтами, що побудована на основі теорії пластичності, а саме вирішення задачі о впровадженні клина в жорстко-пластичну область, дозволяє моделювати будь яку комбінацію умов різьбоформування (умови тертя, герметичність, точність з'єднання) для будь яких сполучень висоти профілю різьби і ширини різьбової западини. Величина d_0 , що розрахована по цій методиці менша, ніж традиційно прийнята рівною $\frac{1}{2} h$, а допуск на діаметр під різьбу може бути збільшеним в порівнянні з метричною різьбою за рахунок компенсації “кратером” різьби.

References

- [1] B.V. Kopei *et al.*, “The influence of manufacturing technology on the strength of the pump rod thread”, *Oil and gas energy*. - No. 2. pp. 14–20, 2014. <http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nge>
- [2] R.E. Chumakov, “Technological principles of control of assembly and thread-forming processes”, Ph.D. dissertation, Chita: ChGTU, 2002. Available: <https://tekhnosfera.com/tehnologicheskoe-obespechenie-zatyazhki-i-stoporeniya-soedineniy-s-krepyozhno-rezboobrazuyuschimi-detalyami>
- [3] Q. He *et al.*, “Research and Optimization of Process Parameters for Internal Thread Forming Based on Numerical Simulation and Experimental Analysis”, *Materials*, 15(9), 3160, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15093160>
- [4] Kuroda, Mitsutoshi. “Plane strain wedge indentation revisited”, *Proceedings of the Royal Society of London Series A* 478.2262 (2022): 20220204. <https://doi.org/10.1098/rspa.2022.0204>
- [5] R.S. Dmytrenko, “Technological support of the assembly-thread forming process at the stage of drilling with the end part of a self-tapping screw”, M.S. thesis, Kyiv, 2018. Available: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/31109/5/Dmytrenko_magistr.pdf
- [6] J. Chakraborty, *Theory of Plasticity*, Elsevier, 3th ed., 2006.
- [7] A.K. Biswas, S. Das, B. Das and S. Das, “Estimating Conical Indentation Load by Numerical Slip-line Field Technique”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 45, No. 1, pp. 118–124, 2018.
- [8] A.O. Lebedev, M.I. Bobyr and V.P. Lamashevskiy, *Mechanics of materials for engineers*, Kyiv: NTUU “KPI”, 2006.

- [9] L. Danylova and T. Waiyki, "Effect of kinematics of the process of screwing on a quality of threaded connections", *Journal of Mechanical Engineering NTUU "Kyiv Polytechnic Institute"*, No. 2 (77), 2016. DOI: 10.20535/2305-9001.2016.77.65482
- [10] L.N. Danylova, "Visualization method for calculating the diameter for subsequent thread rolling", *Modern Scientific Bulletin*, 2013, 11.1: 99-104. Available: http://www.rusnauka.com/9_SNP_2015/Tecnic/3_188290.doc.htm
- [11] Sandvik Coromant Thread cutting. Choice of methods and tools. Available: <https://carbidedtool.ru/threading>

Peculiarities of calculating the diameter of the hole for setting the thread-forming part

L.M. Danylova, S.V. Lapkovskiy, V.P. Prykhodko

Abstract. The effectiveness of technologies is determined by the total technical effect obtained from their implementation. One of the ways to improve technology efficiency indicators is the introduction of assembly-thread-forming processes based on the use of thread-forming fasteners in product designs.

Thread-forming screws, pins, bushings are screwed into smooth holes and form a threaded profile by cutting or deformation. The reduction in labor intensity is achieved by eliminating the operation of preliminary threading, and the resulting connections have high operational and technical indicators. In the production of electronic equipment and devices, where, according to technical requirements, the formation of chips is undesirable, thread-extruding screws are used. Despite the advantages of self-tapping screws, their widespread use is restrained by several disadvantages: the strength of the connection using screws is lower than in the connection using a stud or bolt, screws with an increased pitch have unsatisfactory locking performance, with a diameter of more than 10 mm torque instability and thread profile deformation are observed. Improving the quality of threaded joints by ensuring the optimal size of the hole for threading is the topic of this publication. The calculation of the setting diameter for thread-forming parts with a large step has its own characteristics and must be decided taking into account friction, strength and tolerance.

The main causes of surface defects in the installation of thread-forming fasteners are those related to geometry - rolling in a filled contour, which leads to an axial displacement of the surface layers of the metal. Determining the optimal value of the diameter of the hole for screwing the thread-forming part, on the one hand, as large as possible, but not more than the permissible value, is the purpose of this work. The nomenclature of thread-forming fastening elements is constantly expanding, while the ratio of the height of the profile to the step is a variable value even within the limits of one standard. Therefore, the calculation method should be universal, taking into account the conditions of friction, strength, tolerances.

Thread forming processes are described as plane deformation processes. Physically, the mechanism of plastic deformation of metals is presented in the form of shifts in planes where the tangential stresses have reached their maximum value. For plane deformation, the trajectories of maximum tangential stresses in two orthogonal directions are described by slip lines, or characteristics.

The slip line method allows you to calculate contact stresses and deforming forces, fully determine the fields of stresses and velocities in the sections of deformable metal, and also analyze local phenomena, which are usually fundamental in solving technological problems. The characteristics of plane plastic deformation allow you to find a solution using a graphical method. The use of this method allows you to determine the appearance of the slip line field, or its geometric characteristics, which establish the relationship between the maximum tangential stress and normal hydrostatic pressure, i.e., the deforming force, as well as determine the appearance and geometric parameters of the formed profile, the height of which is limited by the permissible amount of overflow of the profile.

Analyzing the geometric parameters of the deformation zone of the threaded turn of the part, the diameter of the hole for the thread-forming fastening part was theoretically justified. The methodology of this calculation is implemented in the form of software and mathematics. These recommendations are related to the geometric parameters of the end part of the self-tapping screw. The results of the work will improve the quality of the connection with the thread-forming fastening part due to the optimization of the diameter of the hole of the part.

On the basis of solving the problem of the plasticity theory about the immersion of the indenter into the rigid-plastic region and the analysis of the plastic zone in the region of the largest deformations, the geometric parameters and the appearance of the formed profile are established. The method of using sliding lines allows you to calculate and analyze the geometry visually, to observe the change in the shape of the deformable profile from the ratio of the height of the profile to the pitch of the thread, the material and the coefficient of sliding. This visualization allows you to choose a value of filling the profile even greater than one, when a sufficiently large size of the "crater" of the thread does not allow the profile to overflow. This makes it possible to increase the height of the thread profile and the contact area, as well as to expand the tolerance for the hole in the part. As a result, we have an increase in the strength of the connection and the reliability of the assembly process.

Keywords: Assembly operation; thread forming; plastic deformation.