

У ДК 65.011.5:621.882.002.72

В.Я. Копп, проф., д-р техн. наук,

В.П. Поливцев, доцент, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

root@sevgtu.sevastopol.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТНОСИТЕЛЬНОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Рассматриваются теоретические вопросы сборки резьбовых соединений, в частности, винтовые. Математическая модель позволяет определить время процесса, закон изменения пространственного положения винта, скорость вращения винта и отвертки. Полученные теоретические результаты подтверждены экспериментально.

Резьбовые соединения являются менее технологичными соединениями с точки зрения автоматизации процесса сборки по сравнению с неразъемными соединениями (развальцовки, прессования и др.), но их доля в конструкции машин, приборов остается достаточно высокой. В таких отраслях, как электротехническая радио- и приборостроительная удельный вес резьбовых соединений достигает 40...50 % от общего объема операций закрепления. Основу составляют винтовые соединения с диаметром резьбы М2...М6. Автоматизация процесса сборки резьбовых соединений успешно решается современными средствами для сборки, но в то же время эти устройства дают большой процент брака (несобираемость, нарушения поверхностей первых витков резьбы) по сравнению с другими видами устройств для закрепления деталей, что связано с не достаточным исследованием процесса и не всегда обоснованным выбором режимов автоматической сборки резьбовых соединений.

На надежность процесса сборки резьбовых винтовых соединений влияет точность пространственного ориентирования и режимы сборки (скорость вращения и вертикальной подачи отвертки, вертикальное усилие отвертки на винт). Исследованию режимов сборки и процесса относительного ориентирования резьбовых соединений посвящены ряд работ, где отмечается, что собираемая деталь в процессе сборки вращается вокруг неподвижной точки пока не совпадут следы сопрягаемых поверхностей [1].

Процесс автоматической сборки резьбовых соединений будем рассматривать, как несколько протекающих во времени

последовательных этапов и если не был выполнен любой предыдущий этап сборки, последующие осуществлены быть не могут, сборка не произойдет. К таким этапам относится: относительное ориентирование винта и резьбового отверстия; наживление винта; завинчивание винта на полную глубину, затяжка винта.

Базирование винта перед сборкой осуществляется в раскрывающихся или трубчатых ловителях, причем последний является более универсальным так как позволяет его использование и для коротких винтов.

В процессе сборки резьбового соединения при базировании винта в трубчатом ловителе существует этап относительного ориентирования, где винт совершает вращение вокруг неподвижной точки до момента совпадения следов резьбы. Началом этапа является момент касания подпружиненной насадкой головки винта в одной точке. Контакт между винтом и насадкой происходит под действием сил трения. Затем наступает процесс восстановления винтом вертикального положения, при этом винт вращается вокруг одной неподвижной точки резьбового торца, проскальзывая относительно точки касания насадки. Концом данного этапа является совпадение (с допустимой погрешностью) центров и осей резьбового отверстия и винта. Затем наступает этап наживления винта в резьбовое отверстие. Рассмотрим этап относительного ориентирования с целью получения процесса восстановления винтом вертикального положения и последующей возможности его наживления в резьбу отверстия.

Движение винта на этом этапе представим как вращение твердого тела вокруг неподвижной точки [2]. Введем неподвижную систему координат X', Y', Z' с началом координат в точке «а» и подвижную X'', Y'', Z'' , связанную с твердым телом (винтом) с началом в той же точке и неподвижную систему координат X, Y, Z связанную с центром резьбового отверстия (рисунок 1). Моменты количества движения твердого тела (винта) относительно подвижных осей имеют вид:

$$L_{X''} = J_{X''} \omega_{X''} - J_{X''Y''} \omega_{Y''} - J_{X''Z''} \omega_{Z''}; \quad (1)$$

$$L_{Y''} = -J_{X''Y''} \omega_{X''} + J_{Y''} \omega_{Y''} - J_{Y''Z''} \omega_{Z''}; \quad (2)$$

$$L_{Z''} = -J_{X''Z''} \omega_{X''} - J_{Y''Z''} \omega_{Y''} + J_{Z''} \omega_{Z''}. \quad (3)$$

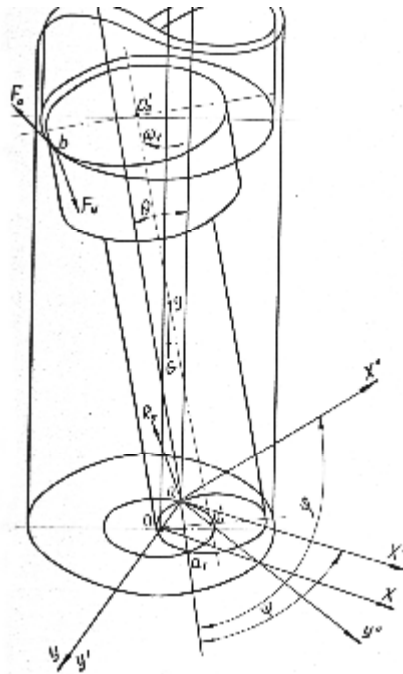


Рисунок 1 – Физическая модель процесса относительного Ориентирования винта и резьбового отверстия

Здесь $L_{x''}, L_{y''}, L_{z''}$ – главные моменты количества движения относительно осей $X''Y''Z''$; $J_{x''}, J_{y''}, J_{z''}$ – моменты инерции относительно осей $X''Y''Z''$; $J_{x''y''}, J_{x''z''}, J_{y''z''}$ – полярные моменты инерции; $\omega_{x''}, \omega_{y''}, \omega_{z''}$ – проекции угловой скорости тела на соответствующие оси координат.
Динамические уравнения Эйлера для твердого тела (винта), связанного с осями $X''Y''Z''$, имеют вид

$$\frac{dL_{x''}}{dt} + \omega_{y''}L_{z''} - \omega_{z''}L_{y''} = M_{x''}; \quad (4)$$

$$\frac{dL_{y''}}{dt} + \omega_{z''}L_{x''} - \omega_{x''}L_{z''} = M_{y''}; \quad (5)$$

$$\frac{dL_{z''}}{dt} + \omega_{x''}L_{y''} - \omega_{y''}L_{x''} = M_{z''}, \quad (6)$$

где $M_{x''}, M_{y''}, M_{z''}$ – главные моменты внешних сил относительно осей $X''Y''Z''$.

Для описания движения винта в направляющей трубке необходимы кинематические уравнения. Входящие в эти уравнения проекции угловой скорости на подвижные оси координат вычисляются по углам Эйлера с помощью формул

$$\omega_{x''} = \psi \sin \theta \sin \varphi + \dot{\theta} \cos \varphi; \quad (7)$$

$$\omega_{y''} = \psi \sin \theta \cos \varphi - \dot{\theta} \sin \varphi; \quad (8)$$

$$\omega_{z''} = \psi \cos \theta + \dot{\phi}, \quad (9)$$

где ψ – угол прецессии, образованный линией узлов с неподвижной осью AX' в плоскости $X'AY'$; θ – угол нутации, расположенный в плоскости между осями AZ' и AZ'' ; φ – угол чистого вращения, расположенный в плоскости между линией узлов и осью AX'' .

Сделав подстановку значений $L_{x''}, L_{y''}, L_{z''}$ из выражений (1), (2), (3) в соответствующие значения выражений (4), (5), (6), и преобразовав эти уравнения относительно ускорений $\ddot{\phi}_{x''}, \ddot{\phi}_{y''}, \ddot{\phi}_{z''}$, получим:

$$\ddot{\phi}_{x''} = \frac{1}{AJ_{x''}} (B_2 M_{x''} + Q_2 M_{y''} + C_2 M_{z''} + D_2 \omega_{x''}^2 + E_2 \omega_{y''}^2 + I_2 \omega_{z''}^2 + U_2 \omega_{y''} \omega_{z''} + V_2 \omega_{x''} \omega_{y''} + W_2 \omega_{x''} \omega_{z''}); \quad (10)$$

$$\ddot{\phi}_{y''} = \frac{1}{A} (B M_{x''} + Q M_{y''} + C M_{z''} + D \omega_{x''}^2 + E \omega_{y''}^2 + I \omega_{z''}^2 + U \omega_{y''} \omega_{z''} + V \omega_{x''} \omega_{y''} + W \omega_{x''} \omega_{z''});$$

$$\ddot{\phi}_{z''} = B_1 M_{x''} + Q_1 M_{y''} + C_1 M_{z''} + D_1 \omega_{x''}^2 + E_1 \omega_{y''}^2 + I_1 \omega_{z''}^2 + \quad (11)$$

$$+ U_1 \omega_{y''} \omega_{z''} + V_1 \omega_{x''} \omega_{y''} + W_1 \omega_{x''} \omega_{z''}. \quad (12)$$

Здесь $A, B, B_1, B_2; Q, Q_1, Q_2; C, C_1, C_2; D, D_1, D_2; E, E_1, E_2; I, I_1, I_2;$
 $U, U_1, U_2; V, V_1, V_2; W, W_1, W_2$ –

коэффициенты, зависящие от моментов инерции и полярных моментов инерции винта относительно осей $X''Y''Z''$.

Приведем кинематические уравнения (7), (8), (9) к нормальной форме Коши, преобразовав их относительно $\dot{\theta}, \dot{\phi}, \dot{\psi}$. Уравнения примут вид:

$$\Phi = \frac{\omega_{X''}}{\cos \varphi} - (\omega_{Z''} - \omega_{X''} \operatorname{tg} \varphi) \sin \varphi; \quad (13)$$

$$\Phi = \omega_{Z''} - \frac{\omega_{Y''} + \omega_{X''} \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \theta (\cos \varphi + \operatorname{tg} \varphi \sin \varphi)}; \quad (14)$$

$$\Psi = \frac{\omega_{Y''} + \omega_{X''} \operatorname{tg} \varphi}{\sin \theta (\cos \varphi + \operatorname{tg} \varphi \sin \varphi)}. \quad (15)$$

Представим главные моменты внешних сил, действующих на винт относительно осей X'', Y'', Z'' (рисунок 2). Головка винта в начале этапа относительного ориентирования касается в точке «b» подпружиненной по оси Z насадки с отверткой, отрываясь при этом от стенки трубчатоголовителя. Плоскость $X''aZ''$ не проходит через точку «b».

Определим нормальную силу, передаваемую конусом насадки в точке «b», в виде

$$F_N = \frac{F}{\sin \beta}, \quad (16)$$

где F – сила взаимодействия насадки и головки винта; β – угол конуса насадки.

Сила, действующая в плоскости $X''Y''a$, представлена в виде:

$$F_{NX''Y''} = F_N \cos(\beta + \theta). \quad (17)$$

Насадка в процессе контакта вращается вокруг своей оси и передает винту вращение посредством сил трения $F_O = fF_N$, где f – коэффициент трения скольжения

Проекции сил, действующих на винт по оси координат $X''Y''Z''$, определяются как

$$F_{NX''} = F_{NX''Y''} \cos \frac{\varphi - \psi}{2}; \quad (18)$$

$$F_{NY''} = F_{NX''Y''} \sin \frac{\varphi - \psi}{2}. \quad (19)$$

$$F_{NZ''} = F_N \sin(\beta + \theta) \quad (20)$$

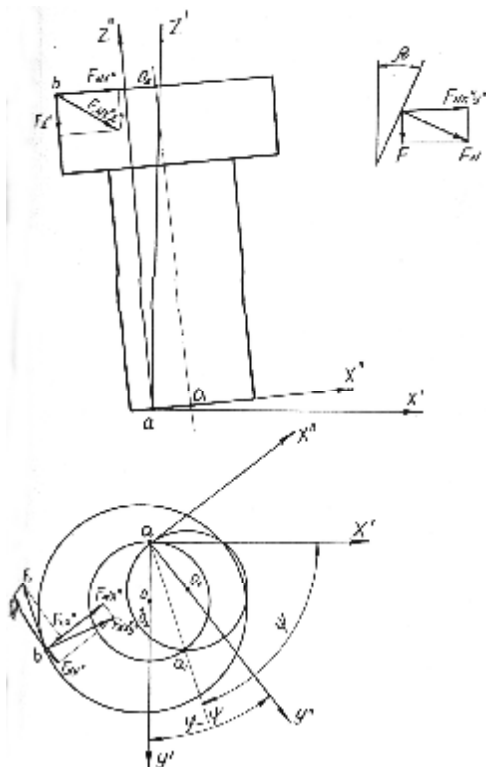


Рисунок 2 – Схема действия сил на винт

Аналогично определяем для окружной силы:

$$F_{Ox}'' = F_O \sin \frac{\varphi - \psi}{2}; \quad (21)$$

$$F_{Oy}'' = F_O \cos \frac{\varphi - \psi}{2}, \quad (22)$$

а также от силы веса винта:

$$G_{x''} = G_{x''y''} \sin \frac{\varphi - \psi}{2} \quad (23)$$

$$G_{y''} = G_{x''y''} \cos \frac{\varphi - \psi}{2} \quad (24)$$

$$G_{z''} = G \cos \theta \quad (25)$$

здесь $G_x''y'' = G \sin \theta$; $G = mg$; m – масса винта; g – ускорение свободного падения.

Исходя из выше указанных соотношений (16)...(25), определим моменты M_x'', M_y'', M_z'' в виде:

$$M_x'' = F_{Oy}''Z_B'' - F_{Ny}''Z_B'' - F_{Nz}''Y_B'' - G_y''Z_g'' - G_z''Y_g''; \quad (26)$$

$$M_y'' = F_{Oy}''Z_B'' + F_{Ny}''Z_B'' - F_{Nz}''X_B'' - G_x''Z_g'';$$

$$M_z'' = F_{Oy}''Z_B'' - F_{Nx}''Y_B'' - F_{Ox}''Y_B'' - F_{Nx}''X_B'' + G_x''Y_g''. \quad (27)$$

$$(28)$$

Решим совместно систему уравнений (10) – (15), подставив в них значения M_x'', M_y'', M_z'' из выражений (26) – (28). Система уравнений решалась при следующих начальных условиях: θ_H, ϕ_H, ψ_H – определялись из занимаемого винтом положения в трубчатомловителе, а $\dot{\theta}_H = 0, \dot{\phi}_H = 0, \dot{\psi}_H = 0$.

Численно решая систему указанных уравнений, сначала определяем угловые ускорения $\ddot{\phi}_x'', \ddot{\phi}_y'', \ddot{\phi}_z''$, затем угловые скорости $\dot{\omega}_x'', \dot{\omega}_y'', \dot{\omega}_z''$ и значения углов θ, ϕ, ψ . Вычисления прекращаются, когда значения углов θ, ϕ, ψ достигают некоторых допустимых значений для условий собираемости резьбовых соединений.

Предложенная модель процесса относительного ориентирования позволяет получить закон изменения положения винта в трубчатом ловителе, время процесса, скорость вращения винта и скорость проскальзывания относительно насадки.

Экспериментальные исследования определения изменений пространственного положения винта проводились путем помещения последнего в прозрачную направляющую трубку. Положение любого тела определяется двумя ортогональными проекциями этого тела. На рисунке 3 изображена схема получения двух ортогональных изображений винта.

Изображение фронтальной проекции винта 1 получаем непосредственно через прозрачную трубку 2. Изображение профильной проекции винта 1 получаем при его отражении от зеркальной поверхности 3, расположенной под углом 45° к осям симметрии центра прозрачной трубки 2. Так как необходимо исследовать быстротекающий процесс, для фиксирования изображений винта применялись два метода съемки, показанные на

рисунке 4. В первом случае, использовалась ускоренная кинокамера 4, а во втором – метод стробосфотографирования

Во втором случае вместо кинокамеры использовался вращающийся фотоаппарат 4, и винт 1 освещался стробоскопической лампой 5. Первый метод позволял (возможности кинокамеры) снимать достаточно длительный процесс - несколько секунд с дискретностью сотых долей секунды и получением каждого двойного изображения на отдельном кадре. Второй – имел ограничения по длительности (0,3 с), но обеспечивал дискретность тысячных долей секунды и получении нескольких двойных изображений на одном кадре.

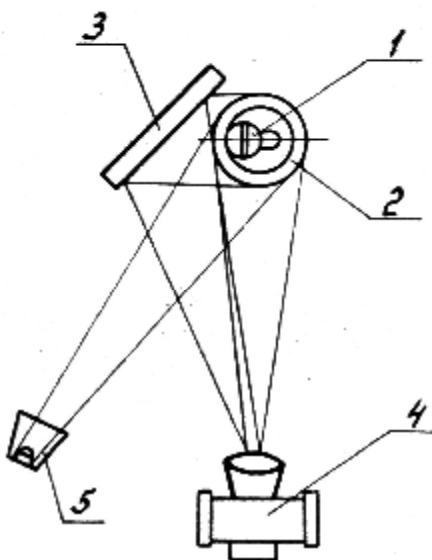


Рисунок 4 – Схема кино и фотосъемки

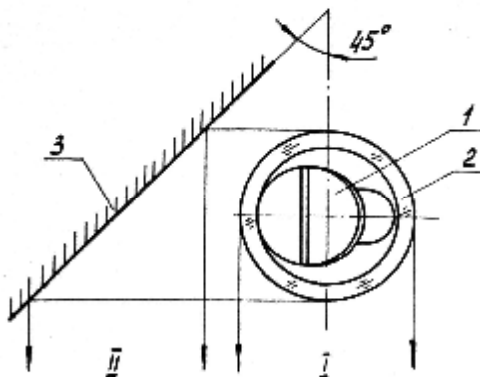


Рисунок 3 – Схема получения двух проекций винта

Экспериментальные исследования проводились для винтов МЗ...М5 с длиной резьбовой части 6...20мм, со сферической и цилиндрической отверткой и скоростью вращения отвертки с насадкой $\omega = 2,5 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. На винт наносились метки, что позволяло отслеживать вращение винта вокруг своей оси в пределах одного оборота. Для получения более точных результатов этап относительного ориентирования снимался вторым методом стробосфотографирования. Графическая информация, полученная обоими методами, позволяла фиксировать пространственное положение винта в направляющей трубке и его вращение вокруг собственной оси.

На рисунке 5 изображен процесс восстановления винта на этапе его относительного ориентирования. Кривые 1 и 2 представляют собой теоретические траектории центров головки и

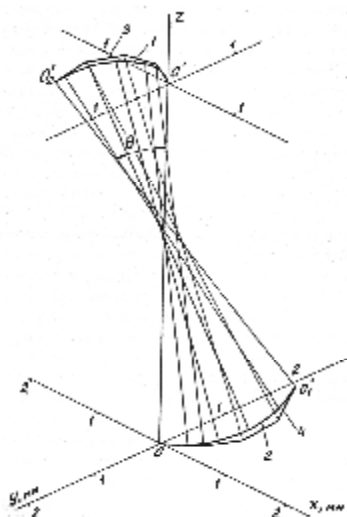


Рисунок 5. Процесс восстановления

резьбового торца винта в направляющем трубчатом ловителе, рассчитанные по выше приведенной математической модели. Ломанные 3 и 4 представляют собой экспериментальные траектории выше указанных центров, полученные после обработки графической информации, полученной методом стробосфотографирования. Ось OO' является осью

резьбового отверстия базовой детали. Кривые 1 и 2 показывают движение центров винта из точек O'_1 и O'_2 (начальные положения винта в трубчатом ловителе к точкам O , O' конечного положения для наживления в резьбовое отверстие.

Предложенная модель процесса относительного ориентирования позволяет получить закон изменения положения винта в трубчатом ловителе, время процесса, скорость вращения винта и скорость проскальзывания относительно насадки.

Полученная скорость относительного проскальзывания при достаточно больших скоростях отвертки с насадкой $\omega = 3,0 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ не превышала допустимую скорость (1200 об/мин) в момент захода лезвия отвертки в шлиц винта. Результаты математического моделирования подтверждены экспериментально и позволяют выбирать оптимальные режимы сборочного процесса, повышая тем самым его надежность и для резьбовых соединений.

Библиографический список

1. Головащенко В.Е. Условия собираемости винтового соединения при автоматической сборке / В.Е. Головащенко // Сб. научн. тр. с\х ин-та, Львов. — 1978. — Т.79. — С. 68 — 74.
2. Сталидзан А.А. Условия совмещения винта с отверткой охватываемой детали посредством отвертки / А.А. Сталидзан // Автоматизация процессов. — Рига, 1975. — Вып.5. — С.24 – 25.
3. Бать М.И.: Теоретическая механика в примерах и задачах / М.И. Бать, Т.Ю. Джанилидзе, А.С. Кельзон. — М.: Наука, 1985. — Т.2. — 560 с.

Поступила в редакцию 10.02.2005 г.