

А.Н. Прокофьев, д.т.н.

ФГБОУ ВПО Брянский государственный технический университет

ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ ПРИ СБОРКЕ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В статье изложены вопросы технологии сборки гладкорезьбовых соединений. Показаны преимущества данного метода по сравнению с традиционными способами установки резьбовых шпилек в корпусные детали, которые выражаются в повышении производительности и снижении себестоимости сборки, возможности полной автоматизации процесса и улучшении качества получаемого соединения.

Введение. Одной из основных задач машиностроения на современном этапе, наряду с обеспечением высокого технического уровня, является повышение качества изделий машиностроения, которое определяет рентабельность их эксплуатации, производственные мощности, затраты материальных и трудовых ресурсов на выпуск новых изделий, а во многих случаях и безопасность их эксплуатации.

Качество изделия – довольно емкое понятие. Оно включает такие компоненты, как коэффициент полезного действия, производительность, точность, металлоемкость, надежность, ремонтпригодность, бесшумность в работе, удобство и легкость управления и обслуживания, эстетичность и др.

Качество изделия закладывается конструктором при проектировании выбором рациональных схем и прогрессивных рабочих процессов, использованием современных достижений в методах расчета динамики и прочности машин, без которых невозможно избежать вложения в конструкцию лишнего материала, выбором материалов с обязательной ориентировкой на будущую технологию производства, применением унифицированных узлов, деталей, приборов, уже хорошо зарекомендовавших себя в эксплуатации и многими другими факторами.

Актуальность проблемы качества особенно возрастает с повышением напряженности цикла работы машин, снижением металлоемкости. В соответствии со стандартом, качеством продукции называется совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии

с ее назначением. Показатель качества – это количественная характеристика одного или нескольких свойств продукции, входящих в ее качество, рассматриваемая применительно к определенным условиям ее создания и эксплуатации. Основными показателями и признаками качества изделия, их узлов и деталей являются: показатели назначения, надежности, безопасности, технологичности, эргономические и эстетические показатели, показатели стандартизации и унификации, патентно-правовые и эстетические показатели.

Технология на всех этапах производства играет определяющую роль в обеспечении качества машин, что выражается посредством создания конструкционных материалов, изготовления заготовок, финишной обработки, формирующей окончательные свойства деталей, сборки, испытаний, конструкторско-технологической доводки.

Основная часть. Вопросы обеспечения и повышения качества изделий при сборке на протяжении последних десятилетий получили в Брянской технологической школе существенное изучение и развитие. В связи со своими научными интересами особое внимание уделялось и уделяется вопросам обеспечения и повышения соединениями различных типов своих эксплуатационных свойств посредством формирования определенного качества поверхности сборочных деталей, например таких как, прочность посадок с натягом, герметичность соединений, надежность резьбовых соединений и др. [1–4].

Основными видами крепления корпусных деталей являются шпилечные резьбовые соединения. Данные соединения по сравнению с болтовыми примерно на 30 % легче по суммарному весу, до 30 % меньше трудоемкость механической обработки, отсутствует часто встречающийся дефект – обрыв головки болта при эксплуатации изделия. Особенно широкое применение шпилечные резьбовые соединения находят при изготовлении корпусных деталей из алюминиевых и магниевых сплавов, а также чугуна в двигателестроении, автомобилестроении, авиастроении и т. д. Одним из основных требований, предъявляемых к данным соединениям, является отсутствие самоотвинчивания в процессе эксплуатации изделия. Применение мер против самоотвинчивания является неотъемлемым элементов проектирования современных резьбовых соединений, хотя это во многих случаях и усложняет технологию изготовления и сборки резьбовых соединений и удорожает продукцию. Вследствие широкого распространения работы машин в условиях резко меняющихся режимов работы наблюдается рост факторов, способствующих ослаблению стопорящих свойств соединений. Это

обстоятельство и рост требований к повышению надежности соединений и узлов обосновывают то внимание, которое уделяется вопросу стопорения шпильчатых резьбовых соединений.

Наиболее широкое применение получил такой метод стопорения, как посадка шпильки с натягом по среднему диаметру. Стопорение шпильки происходит за счет сил трения, возникающих на профиле от радиального натяга. При таком способе посадки шпилек ни в теле шпильки, ни в материале корпуса не возникает существенных дополнительных напряжений. Резьбовые соединения отличаются достаточно высокой стабильностью момента вывинчивания в условиях статической нагрузки, однако, при воздействии циклических нагрузок стабильность момента вывинчивания теряется. К недостаткам данного метода также следует отнести следующее:

- высокие требования к точности изготовления резьбы и, вследствие этого, стоимость шпилек и корпусных деталей повышается;
- необходимость сортировки шпилек на группы перед сборкой;
- снижение ремонтпригодности соединения;
- сложность автоматизации процесса сборки.

Шпильки, установленные с натягом по среднему диаметру, для повышения стопорящих свойств часто дополнительно стопорят при помощи различных способов: обжатием материала корпуса вокруг шпильки кольцевой оправкой, введением в резьбовое гнездо вкладыша из упругого материала и т. п.

Помимо посадки резьбовых соединений с натягом по среднему диаметру, существует еще ряд способов стопорения шпилек в корпусных деталях:

- посадка на сбеги резьбы;
- посадка с помощью плоского или конического бурта;
- посадка с упором в дно отверстия или в последние витки резьбы;
- посадка на клею;
- посадка с помощью различных шагов резьбы;
- посадка с помощью дополнительных стопорящих элементов.

Указанные способы стопорения шпилек имеют либо достаточно ограниченную область применения, либо высокую себестоимость, либо пониженную надежность с точки зрения стопорящих свойств, особенно в процессе эксплуатации.

Ориентация на широкое внедрение автоматизированных технологий потребовала разработки новых технологических и конструкторских решений в области образования надежных резьбовых соединений. Разработаны соединения на специальных клеях, с

использованием специальных вставок (футорок), однако наиболее перспективным следует считать внедрение гладкорезьбовых соединений. Такое соединение образуется ввертыванием резьбовой шпильки в гладкое отверстие корпуса из литейных алюминиевых или магниевых сплавов (рис. 1), при этом за счет пластической деформации металла корпуса образуется достаточно прочное и надежное соединение. Применение таких соединений позволяет [5, 6]:

- снизить себестоимость изготовления соединения за счет применения шпилек более низкой степени точности (6...8 степени точности) в отличие от шпилек для посадки с натягом по среднему диаметру; исключения операции нарезания резьбы в отверстии корпусной детали; отсутствия сортировки шпилек и отверстий на группы перед сборкой;

- механизировать процесс сборки соединения на универсальном оборудовании и автоматизировать на станках с ЧПУ, что позволяет повысить производительность в несколько раз;

- обеспечить стабильность стопорящих свойств соединения в процессе эксплуатации, что объясняется деформационным методом получения резьбы в корпусной детали и исчерпанием пластических деформаций материала при изготовлении резьбовой поверхности.



Рис. 1. Гладкорезьбовое соединение

Внедрение гладкорезьбовых соединений началось с использования так называемых самонарезающих винтов, которые изготавливались из закаленной стали и имел в поперечном сечении форму округленного многогранника для более легкого ввинчивания в отверстие. Способ обеспечивает достаточно прочное соединение, но имеет определенные

недостатки: более высокая стоимость винтов в связи с усложнением их изготовления и уменьшение прочности крепежного соединения из-за неполного контакта резьбовых поверхностей винтов и отверстий в связи с наличием огранки в поперечном сечении винтов. В дальнейшем на основе самонарезающих винтов были разработаны конструкции бесстружечных метчиков для получения точных резьб в отверстиях методом пластического деформирования. В гладкорезьбовых соединениях отказались от применения дорогостоящих самонарезающих винтов. Такие соединения обеспечивают плотный контакт резьбовых поверхностей и находят применение вместо резьбовых метрических соединений с натягом в корпусных деталях из алюминиевых и магниевых сплавов.

Для возможности получения гладкорезьбовых соединений необходимо выполнение следующих условий:

- необходимость, чтобы твердость материала шпильки была значительно выше твердости корпуса;

- материал корпуса должен обладать определенной пластичностью, необходимой для затекания материала во впадины резьбы шпильки;

- необходимо учитывать масштабный фактор, т.к. начиная с некоторого шага резьбы, происходит перераспределение чрезмерных объемов металла, что приводит к перенаклепу поверхности в зоне контакта и ее разрушению;

- толщина стенок деталей, вблизи которых происходит завинчивание шпильки, не может быть меньше некоторой величины, начиная с которой возникают значительные пластические и упругие деформации этих стенок и искажение сопрягаемых поверхностей.

В связи с этим, наиболее целесообразно применение гладкорезьбовых соединений при ошпиловке широко применяемых в машиностроении корпусных деталей, выполняемых из алюминиевых литейных сплавов групп алюминий – кремний и алюминий – кремний – медь. Оптимальной твердостью для корпусных деталей следует считать HB 70...105. Для изготовления шпилек целесообразно использовать конструкционные стали типа сталь 45, сталь 40X, конструкционные легированные стали 38XA, 40X2HMA, 13X11H2BMФ (для корпусных деталей повышенной твердости HB > 100). Длина резьбовой части с обеих сторон принята равной 2d (рекомендованное значение, обеспечивающее возможность достижения равнопрочности стержня шпильки и витков резьбы). У шпилек на обоих резьбовых концах выполняется метрическая резьба одной и той же точности (рекомендуемое значение 6h), что дает

возможность снизить затраты на изготовление за счет значительного расширения поля допуска на средний диаметр, исключить сортировку шпилек на группы, накатывание обоих резьбовых участков производить одним и тем же комплектом накатных роликов.

При постановке стандартных шпилек в корпусные детали с повышенной твердостью ($HВ > 100$) могут возникнуть некоторые затруднения – возникать большие крутящие моменты при сборке и образовываться мелкая стружка. С целью уменьшения момента завинчивания и обеспечения равномерности деформации металла корпусной детали по боковым сторонам профиля была разработана конструкция шпильки с заходным витком, имеющим остроугольную форму с равномерным подъемом по наружному диаметру. Оптимальная длина заходной части шпильки от 1,5 до 2-х шагов резьбы. Для накатывания резьбы на таких шпильках были введены изменения в конструкцию и технологию изготовления накатных роликов.

Достаточно часто корпусные детали имеют минимальные припуски на обработку и облегченные уменьшенные стенки и приливы. При образовании гладкорезьбовых соединений в таких приливах или бобышках необходимо выбирать оптимальную толщину их стенок для предотвращения образования трещин. Очень часто шпильки устанавливаются вблизи поверхностей, образующих точный размер детали (например, отверстие точно 6–7 квалитетов, вокруг которого по фланцу располагаются крепежные шпильки). После ввертывания на поверхности такого отверстия может образоваться выпучивание материала (1), что приводит к погрешности формы отверстия. Исходя из проведенных исследований, получен вывод, что при толщинах стенок менее $0,8d$ возможны их деформации. Величины этих деформаций зависят от толщины стенок, механических свойств материала корпуса, кривизны поверхности и диаметра шпильки. Такие значения стенок следует рекомендовать, когда стенка прилегает к поверхностям, образующим размеры с точностью не ниже 6–7 квалитетов и с высокими требованиями к шероховатости. Величина выпучивания при ввертывании шпилек может быть определена по зависимости:

$$\Delta = 23,2 \cdot \delta^{-2,455} \cdot R^{0,133} \cdot r^{2,215} \cdot \hat{I}A^{-0,502}, \quad (1)$$

где R – радиус поверхности, к которой прилегает стенка, мм; r – радиус шпильки; $HВ$ – твердость материала корпуса.

При получении гладкорезьбовых соединений определяющее влияние на их эксплуатационные свойства оказывает диаметр исходного отверстия. Профиль полученной резьбы определяется

законом постоянства объемов, согласно которому объем тела при его пластическом деформировании остается неизменным. Отсюда вытекает зависимость наружного и среднего диаметра получаемой в отверстии резьбы от объема деформируемого материала. Уменьшение исходного диаметра приводит к образованию более уплотненного профиля резьбы, но одновременно ведет к увеличению момента завинчивания шпильки, что увеличивает опасность разрушения сопрягаемых резьбовых деталей. Увеличение диаметра значительно снижает стопорящие свойства и статическую прочность соединения.

Диаметр отверстия, позволяющего сформировать гладкорезьбовое соединение под ввертывание шпильки для метрических резьб, определяется из решения системы и уравнения (2), значения приведены в таблице 1:

$$\left\{ \begin{array}{l} h_p \geq \frac{(1,155 d - 0,25 P) - \sqrt{(1,155 d - 0,25 P)^2 - 9,24 \frac{Q_p - 0,125 Pd \pi (l - P) k_m \cdot 0,7 \cdot \tau_{a \text{ un}}}{\pi (l - P) k_m \cdot 0,7 \cdot \tau_{a \text{ un}}}}{4,62} \\ h_p \geq \frac{(1,155 d - 0,25 P) - \sqrt{(1,155 d - 0,25 P)^2 - 9,24 \frac{Pd (0,87 \tau_{a \text{ k}} - 0,25 \tau_{a \text{ un}})}{\tau_{a \text{ un}}}}{4,62} \\ h_p \geq \frac{d - \sqrt{d^2 - \frac{4Q}{\pi k_m [\sigma_{ca}]}}}{2} \end{array} \right. \quad (2)$$

$$D_o = \sqrt{d^2 \left(0,5 - \frac{0,3849d}{P} + \frac{0,57735d_2}{P} \right) + D_1^2 \left(0,5 + \frac{0,3849D_1}{P} - \frac{0,57735d_2}{P} \right)}$$

Внутренний диаметр формируемой резьбы D_1 определяется из равенства: $D_1 = d - 2h_p$. Сравнение фактической высоты профиля резьбы с расчетной показывают, что между ними есть различие, которое объясняется принятыми допущениями и пористостью материала.

Отверстие, подготовленное для получения гладкорезьбового соединения имеет определенную шероховатость, которая может оказывать влияние на формирование неполного профиля витка резьбы при пластическом затекании материала в пространство между соседними витками резьбы шпильки. Проведенные исследования показали, что уменьшение высоты витка из-за шероховатости поверхности отверстия (при его получении сверлением) оказывает влияние лишь для резьбовых соединения малого диаметра (M1...M5), а начиная с резьбы M6 уменьшение высоты витка может достигать 10 %, что не оказывает практического влияния на снижение прочности и стопорящих свойств гладкорезьбового соединения.

*Значения диаметров отверстий D_o под шпильку
для гладкорезьбовых соединений*

Размер соединения	Точность резьбы шпильки	Диаметр отверстий D_o (мм) при твердости корпусов НВ			
		70...95		95...120	
		D_o	d сверла	D_o	d сверла
M5	6e	4,445 ^{+0,080}	4,40	4,500 ^{+0,080}	4,50
M6		5,313 ^{+0,093}	5,30	5,360 ^{+0,093}	5,35
M8		7,154 ^{+0,103}	7,15	7,200 ^{+0,100}	7,20
M10		8,993 ^{+0,114}	9,00	9,150 ^{+0,110}	9,15

Проблема сборки шпилечных резьбовых соединений является весьма острой – трудности возникают при попытках автоматизации процесса свертывания шпилек. Применяемые способы посадки упором в дно отверстия или на сбег резьбы требуют использования динамометрического инструмента. Резьбы с натягом по среднему диаметру требуют высокой точности, сортировки на группы, в связи с чем их установка в основном осуществляется вручную. Шпильки предварительно «наживляют» на 2–3 нитки резьбы, а затем довертывают на требуемую глубину ручным инструментом. При этом требуется контроль высоты выступающей части шпильки, которая, как правило, составляет $\pm 0,5$ мм.

Применение гладкорезьбовых соединений позволяет в значительной степени решить указанные выше проблемы и провести механизацию и автоматизацию процесса сборки резьбовых соединений. Отсутствие резьбы в отверстии корпусной детали позволяет обеспечить требуемое направление шпильки при механизированном и автоматизированном процессе сборки. Захват шпильки должен производиться по гаечному резьбовому концу. Наиболее надежным является жесткий резьбовой захват, в дно которого запрессован стальной закаленный шарик. Так прочность резьбы шпильки на срез и смятие выше прочности стержня шпильки на скручивание, то повреждения резьбы гаечного конца не наблюдается.

Гладкорезьбовые соединения чувствительны к перекосу и несоосности шпильки и отверстия, что практически исключает возможность использования ручных механизированных инструментов, таких как шпильковерты. Нецелесообразно использование и агрегатных станков из-за недостаточной прочности шпинделей и

коробок, а также сложности захвата шпилек перед свертыванием. Наиболее приемлемыми для сборки гладкорезьбовых соединений являются сверлильные станки и ЧПУ и радиально-сверлильные станки, оснащенные специальным патроном. Однако более перспективны станки с программным управлением, позволяющие добиться высокой степени автоматизации процесса сборки.

Исследования процесса сборки проводились на сверлильном станке с ЧПУ, имеющим револьверную головку на 6 инструментов. Программа обработки включала сверление отверстий под шпильки двух типоразмеров (М6 и М8), зенкование фасок и завертывание шпилек. Свертывание шпилек производилось по циклу: захват шпильки из кассеты – свертывание ее в деталь. Комплект шпилек устанавливался в специальную кассету. Проворот шпилек в гнездах кассеты при наворачивании на них захвата исключается за счет поджатия подпружиненным шариком. Для свертывания шпилек используется стандартный, входящий в комплект станка, резьбонарезной патрон с односторонней компенсацией, необходимой для согласования вращения шпинделя с осевым перемещением шпильки. Вместо инструмента (метчика) в патрон устанавливается захват с внутренней резьбой и запрессованным шариком, конструкция которого наиболее проста.

Свертывание шпилек производится следующим образом: патрон наворачивается захватом на выступающий конец шпильки и затем вытягивает ее из кассеты. Этот процесс производится по циклу сверления или растачивания. Шпилька свертывается в нужное отверстие по циклу резьбонарезания, выдерживая необходимую высоту над базовой плоскостью корпусной детали. После этого включается реверс шпинделя, и захват свинчивается с гаечного конца шпильки и цикл повторяется для другой шпильки. Длительность одного цикла примерно 50 секунд. Частота вращения шпинделя 90...300 мин⁻¹, подача выбирается также как при резьбонарезании (несколько меньше шага резьбы). При большей частоте вращения шпинделя возникают сложности с обеспечением точности высоты шпильки над базовой плоскостью корпуса.

Выводы. Проведенные исследования показали, что сборка возможна на станках фрезерно-сверлильно-расточной группы как горизонтальной, так и вертикальной компоновки с автоматической сменой инструмента, обладающих либо циклом резьбонарезания, либо программируемым реверсом шпинделя. Автоматическая смена инструмента обеспечивает сборку по программе нескольких типоразмеров шпилек. Свертывание шпилек необходимо производить

стандартними резьбонарезными патронами односторонней компенсации, работающими на вытягивание. Передача момента завинчивания на шпильку производится через резьбу ее гаечного конца специальным захватом. Наиболее рациональным является свертывание шпилек непосредственно после механической обработки отверстий за один установ.

Однако проведенный анализ корпусных деталей показал, что не всегда возможно совмещение операций механической обработки отверстий и сборки гладкорезьбовых соединений, а необходимо проведение специальной сборочной операции после чистовой обработки базовых поверхностей корпуса. Исходя из этого, станки с ЧПУ целесообразно использовать для деталей с большим количеством шпилек, а также для таких деталей, в которые шпильки можно устанавливать непосредственно в ходе механической операции, не снимая деталь со станка.

При невозможности совмещения операций обработки отверстия и сборки соединения, создание гладкорезьбового соединения целесообразно производить на радиально-сверлильных станках с использованием специального патрона. Особенностью гладкорезьбовых соединений является их чувствительность к перекосу оси шпильки. В отличие от обычной резьбы, где направление обеспечивается на первых двух витках, в гладкорезьбовых соединениях шпилька, имеющая короткую заходную часть, плохо центрируется в отверстии. Для компенсации погрешности расположения осей требуется применение патронов с осевой и радиальной компенсацией. Следующим существенным требованием является обеспечение точности высоты шпильки над плоскостью корпуса. Эти два основных требования были учтены в конструкции патрона для свертывания шпильки. В связи с тем, что шпильки имеют короткую гладкую часть (или совсем ее не имеют), конструкция патрона предполагает передачу крутящего момента на шпильку через резьбу ее гаечного конца. Переналадка патрона на другой типоразмер шпильки обеспечивается сменой резьбового захвата. Цикл установки шпильки при частоте вращения шпинделя $125...300 \text{ мин}^{-1}$ занимает примерно 30 секунд, установка шпильки в резьбовой захват осуществляется вручную. При невысоких требованиях к точности высоты выступания шпильки целесообразно применение для сборки стандартного резьбонарезного патрона типа ВНС (имеющего небольшую доработку), оснащенного специальной вставкой для захвата шпильки за гаечный конец. Свертывание шпилек необходимо производить с использованием смазки.

После сборки гладкорезьбовых соединений была произведена экспериментальная оценка эксплуатационных свойств и их сравнение со свойствами резьбовых соединений с натягом, как наиболее широко применяемых в современном машиностроении. Оценивались статическая и усталостная прочность соединения, а также стабильность стопорящих свойств при воздействии циклических нагрузок (моделирование условий эксплуатации соединения). Результаты исследований статической прочности гладкорезьбовых соединений подтвердили обеспечение основного положения несущей способности соединения – достижения равнопрочности стержня шпильки и витков резьбы. Характеристики усталостной прочности двух типов исследуемых соединений практически одинаковы, с некоторым преимуществом гладкорезьбовых соединений – влияние упрочнения при изготовлении внутренней резьбы в корпусе деформированием. При исследовании стабильности стопорящих свойств под воздействием циклических нагрузок было установлено значительное преимущество гладкорезьбовых соединений по сравнению с соединениями с натягом по среднему диаметру резьбы. У соединений с натягом наблюдалось снижение стопорящих свойств по гиперболическому закону уже в начальный период работы соединения (до 1000 циклов нагружения). Момент отвинчивания гладкорезьбовых соединений после воздействия циклических нагрузок практически не изменяется, что объясняется переносом пластических деформаций в резьбе из периода эксплуатации в стадию изготовления (положительное влияние изготовления внутренней резьбы деформированием).

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Суслов А.Г., Федоров В.П., Горленко О.А. и др.* Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений/ Под общ. ред. А.Г. Суслова. – М. : Машиностроение, 2006. – 448 с.
2. *Суслов А.Г.* Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
3. *Суслов А.Г., Прокофьев А.Н.* Новые технологии формирования резьбовых соединений / Тезисы докладов научно-технической конференции. – Донецк, 1994. – С. 121–122.
4. *Суслов А.Г., Стешков А.Е., Хандожко А.В., Прокофьев А.Н.* Технология гладкорезьбовых соединений / Труды международной научно-технической конференции / Брянск, БГТУ, 1994. – С. 127–134.

5. *Прокофьев А.Н.* Технологическое обеспечение прочности и износостойкости резьбовых соединений // Справочник. Инженерный журнал. – 2006. – № 4. – С. 21–24.
6. *Прокофьев А.Н.* Технология гладкорезьбовых соединений / Обработка металлов. Новосибирск, № 2 (15), 2002. – С. 12–14.

ПРОКОФЬЕВ Александр Николаевич – доктор технических наук, заведующий кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВПО Брянский государственный технический университет.

Научные интересы:

– технология машиностроения.

Подано 04.09.2011