

УДК 621.9  
ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ  
ШЛИЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Е. Ю. ДЕМИДЕНКО

Научный руководитель А. А. ЖОЛОБОВ, канд. техн. наук, проф.  
Государственное учреждение высшего профессионального образования  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Могилев, Беларусь

В современном машиностроении особая роль уделяется вопросам прогнозирования качества формируемых изделий на этапе проектирования технологических процессов их изготовления. Обеспечение проектного качества создаваемых технологических систем, в том числе при формировании деталей и их отдельных поверхностей, а также в процессе сборки изготовленных деталей в комплекты и узлы, является одной из важнейших задач индустрии.

Исследования в области поведения технологических систем резания (ТСР) при механической обработке поверхностей деталей на основе математического и графического компьютерного моделирования позволяют на этапе проектирования технологических процессов получать сведения о точности формируемых поверхностей и их взаимного расположения. Результаты этих исследований способствуют созданию качественной машиностроительной продукции в короткие сроки и с оптимальной себестоимостью, что является неотъемлемой частью рыночной экономики, для которой характерна быстрая смена моделей изготавливаемых машин.

В промышленности широкое применение находят шлицевые соединения, так как благодаря такому сопряжению деталей обеспечивается передача крутящих моментов с сохранением подвижности шлицевых деталей друг относительно друга, достигается достаточно высокая прочность соединений, в том числе при динамических и переменных нагрузках. На основе шлицевых соединений работают коробки скоростей и подачи металлорежущих станков, трансмиссии автомобилей, тракторов, многих сельскохозяйственных машин и других агрегатов.

Наиболее широкое распространение среди профильных соединений получили шлицевые соединения с прямобочным, эвольвентным и треугольным профилями (рис. 1), формирование которых на валах осуществляется, как правило, на зубо- или шлицефрезерных станках червячными фрезами, а в отверстиях – долблением или протягиванием.

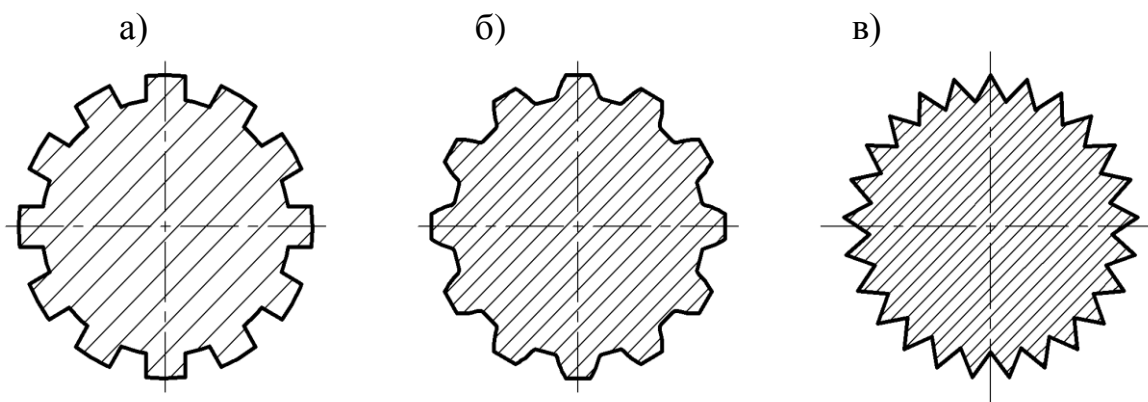


Рис. 1. Поперечные сечения шлицевых поверхностей валов: а – прямоугольный профиль; б – эвольвентный профиль; в – треугольный профиль

Качество шлицевых валов и соединений в целом зависит от множества факторов, участвующих в их формировании, в том числе и жёсткости технологической системы. Что касается формирования прямоугольных шлицевых соединений, то в последние годы в Белорусско-Российском университете проведены теоретические и экспериментальные исследования, направленные на повышение точности шлицевых валов и соединений в целом, базирующиеся на современных методах с использованием новейших приборов, средств вычислительной техники и программирования [1, 2].

В свою очередь, шлицевые соединения с эвольвентным профилем, во многих случаях, более предпочтительны перед соединениями с прямоугольным и треугольным профилями ввиду того, что:

- прочность эвольвентных шлицев выше: на изгиб – благодаря утолщению профиля зуба у основания; на смятие – благодаря увеличенному числу зубьев по окружности;
- эвольвентные шлицы обрабатываются с высокой точностью на стандартном зуборезном оборудовании методом обкатывания с помощью червячных фрез или (на коротких валах) с помощью долбяков;
- в противоположность прямоугольным шлицам, для изготовления которых требуются отдельные червячные фрезы для каждого размера соединения, эвольвентные шлицы одинакового модуля нарезают одной фрезой (или долбяком);
- при переходных посадках по боковым граням шлицы в значительной мере разгружены от изгиба;
- соединение работает преимущественно на срез по основанию шлицев;
- эвольвентные шлицы на валах можно подвергать доводочной обработке: шевингованию, шлифованию, а также упрочняющему обкатыванию;
- лучшее центрирование сопрягаемых элементов;

– втулки с эвольвентными шлицами обладают свойством самоустанавливаться на валу под нагрузкой.

Наряду с достоинствами шлицевых соединений различного профиля по конструкторско-эксплуатационным характеристикам имеет место и ряд серьёзных явлений негативного порядка, при осуществлении технологического процесса их формирования.

Так, обработка шлицевых участков на шлицефрезерных станках сопровождается смещением оси вала относительно главной оси станка, закручиванием шлицев, изменением углов относительного расположения детали и режущего инструмента, неравномерными упругими деформациями всей технологической системы при формировании шлицевой части по её длине и другими нежелательными факторами.

Основной причиной этих явлений выступает податливость технологической системы, существенно изменяющаяся в процессе формирования шлицев, особенно значительной длины.

Надо отметить, что изменение жёсткости системы, при формировании шлицев по длине, приводит к искажению профиля шлиц, что сказывается на качестве всего соединения.

Проблемам формирования шлицевых соединений уделялось и продолжает уделяться большое внимание как со стороны конструкторов и технологов, так и со стороны исследователей в области технологии машиностроения.

Эти исследования, позволяющие существенно повысить качество соединений, проводились по нескольким направлениям, в том числе по обеспечению точности шлицевой поверхности на этапах её изготовления, сборки и контроля.

Общим недостатком данных исследований является отсутствие комплексного подхода, который объединяет все указанные этапы производственного процесса и учитывает взаимное влияние факторов технологической системы при прогнозировании точности. Вследствие этого, возможности оборудования используются не полностью. Применение такого подхода к исследованию позволит полнее раскрыть существующие резервы повышения точности изготовления шлицевых соединений.

Указанное направление, развивающееся в последние годы на кафедре «Технология машиностроения» нашего университета, включает: разработку и экспериментальное подтверждение взаимосвязанных математических моделей процессов изготовления, сборки и контроля шлицевых поверхностей и соединений, поиск и создание новых средств, обеспечивающих точность формирования шлицевых соединений на всех этапах.

Создание комплексного подхода к решению задач по обеспечению точности шлицевых соединений с наименьшими затратами средств, охватывающего процессы изготовления, сборки и контроля становится перво-

степенной задачей перед исследователями и инженерами в различных областях машиностроения.

В рамках указанных направлений сформирован ряд актуальных задач по рассматриваемой проблеме и показаны некоторые пути их решения.

1. Анализ стандартов и исследований, посвящённых периодическим профилям деталей машин, выявил, что при расчётном методе определения предполагаемых деформаций валов на операции шлицефрезерования возникает необходимость в вычислениях осевых моментов инерции в поперечных сечениях детали.

Установлено, что до недавнего времени отсутствовали полные сведения о величинах моментов инерции стандартных прямобочных шлицевых профилей. Применявшиеся методики расчёта моментов инерции эвольвентного профиля не позволяют рассчитать его с достаточной точностью, т. к. базируются на представлении профиля эвольвентного шлица в виде геометрического сложения двух трапеций, т.е. без учёта кривизны боковой стороны [3].

В основу методики определения искомой величины осевого момента инерции был положен принцип суммирования осевых моментов инерции составляющих фигур профилей шлицевых поверхностей валов – треугольников, прямоугольников, секторов, сегментов и эвольвентного профиля, который, в свою очередь, был представлен как множественная сумма моментов трапеций [2].

В результате проведённых расчётов для каждого типа шлицевого соединения осевой момент инерции сечения был определён как сумма осевых моментов всех его составляющих элементарных участков, ориентированных соответственно под углами  $\theta$ . Для этого использовались следующие формулы [4]:

$$J_{x_i} = J_{x_0} \cdot \cos^2 \theta - J_{xy_0} \cdot \sin 2\theta + J_{y_0} \cdot \sin^2 \theta ; \quad (1)$$

$$J_{y_i} = J_{x_0} \cdot \sin^2 \theta + J_{xy_0} \cdot \sin 2\theta + J_{y_0} \cdot \cos^2 \theta , \quad (2)$$

где  $\alpha$  – угол элементарного участка шлицевого профиля;  $z$  – количество шлицев;  $J_x, J_y, J_{x_0}, J_{xy_0}, J_{y_0}$  – суммарные моменты инерции профиля, зависящие от геометрических параметров профиля.

Сравнивая рассчитанные значения осевого момента инерции шлицевого профиля со значениями момента инерции профиля, соответствующего круглой заготовке, установлено, что с геометрической точки зрения формирование шлицев ослабляет сечение примерно на 30–40 % для различных шлицевых профилей. Это приводит к различному характеру прогибов обрабатываемой заготовки на участках до и после обработки.

2. На основании результатов теоретических исследований по увеличению точности формируемых на шлицефрезерном станке поверхностей валов установлена перспективность использования для этой цели технологи-



ческих систем, стремящихся к поддержанию минимальных и постоянных деформаций оси детали, независимо от места нахождения режущего инструмента по её длине.

Для осуществления этого мероприятия наиболее подходящими являются шлицефрезерные станки с ЧПУ, дающие возможность регулирования подачи при перемещении фрезы вдоль оси детали.

Одним из способов обеспечения жёсткости технологической системы обработки нежёстких шлицевых валов является оперативное регулирование динамической настройки шлицефрезерного станка с ЧПУ, которое выполняется непосредственно в процессе формирования фасонных поверхностей (рис. 2).

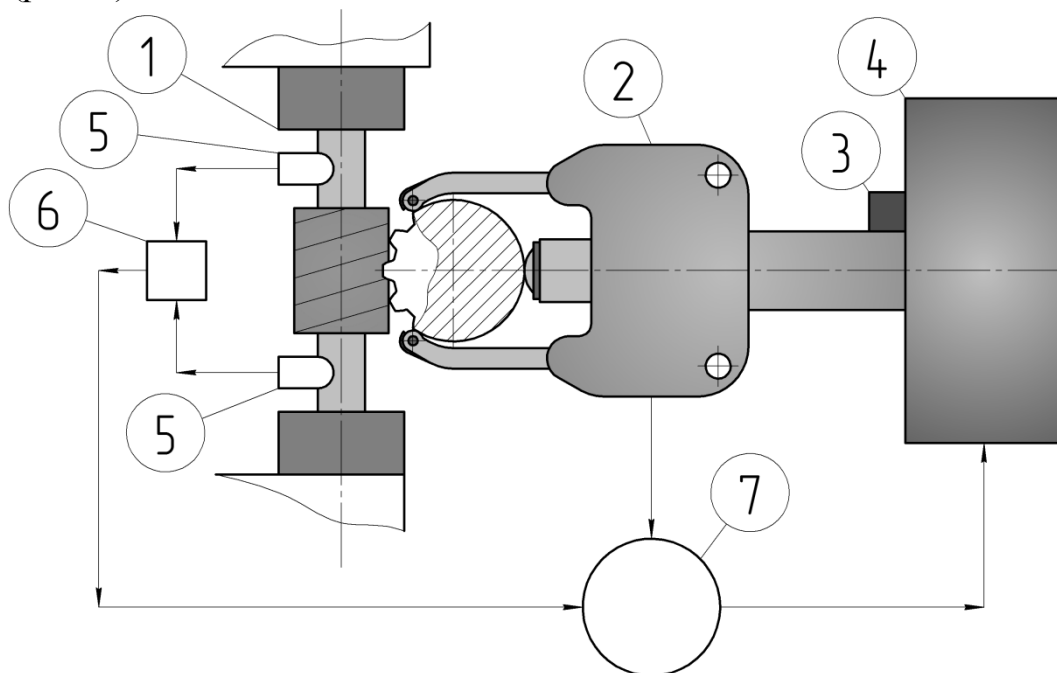


Рис. 2. Устройство для поддержания динамической настройки станка

Регулирование жёсткости станка происходит следующим образом. Червячная фреза, установленная на оправку 1, выполняет обработку шлицев заготовки. В контакте с заготовкой, на её не фрезерованной цилиндрической части, находятся опорные поверхности люнета 2, настройка которого осуществляется с помощью управляющей программы станка с ЧПУ. Радиальная составляющая силы резания, измеряемая датчиками 5, сравнивается с усилием на опорных поверхностях люнета 2. Информация с датчиков поступает для анализа в сумматор 6 и блок управления 7, который в случае рассогласования показаний датчиков усилий, подаёт управляющие сигналы в систему перемещения 4 люнета, положение которого контролируется датчиком 3. Задачей системы, обеспечивающей наиболее полный компромисс принципов активного и адаптивного управления, является уравнивание силы резания силой давления на заготовку со стороны люнета, что исключает деформацию оси заготовки шлицевого вала.

Основными техническими эффектами применения представленного способа регулирования являются повышение производительности процесса шлицефрезерования, снижение объёма бракованной продукции, а также повышение надёжности и точности работы шлицевых соединений вследствие стабильности их геометрических параметров.

3. Исследования формообразования шлицевых поверхностей являются неотъемлемой частью анализа точности шлицевого соединения, однако, само соединение формируется на этапе его сборки. Именно здесь проявляется влияние погрешностей предыдущих этапов и делается заключение о точности соединения.

Задача относительной ориентации деталей на позиции сборки с требуемой точностью, прежде всего, заключается в определении условий их соединения.

Для моделирования собираемости шлицевого соединения используется построение кусочно-непрерывных функций шлицевого профиля вала и отверстия. Так, например, полученная функция  $R(\varphi)$  позволяет построить любой стандартный эвольвентный шлицевый профиль (рис. 3).

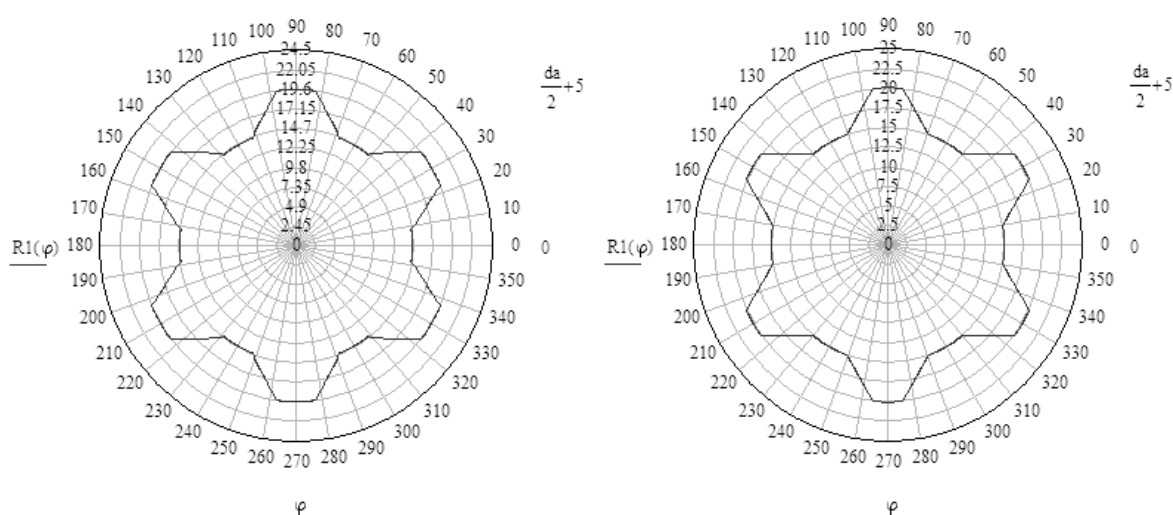


Рис. 3. График функции эвольвентного шлицевого профиля вала (справа) и втулки (слева)

Выведенные функциональные зависимости представляют собой методику прогнозирования, позволяющую устанавливать соответствие геометрических параметров боковых сторон прямобочных и эвольвентных шлицевых соединений с условиями точности и собираемости на этапах их формирования, а также проводить связь собираемости с точностью изготовления компонентов шлицевых соединений.

4. Логическим завершением комплекса технологических, опытно-конструкторских и экспериментально-исследовательских работ, направленных на повышение точности изготовления шлицевых поверхностей на валах и в отверстиях является создание универсальных конструкций приспособлений для контроля профиля шлицев.

Контроль формы конкретного поперечного сечения шлица на валах и в шлицевых втулках можно осуществить при помощи профильных калибров, а их изменение в продольном сечении и положение по отношению к оси детали и другим шлицам можно проконтролировать только при помощи специальных устройств, которые, в частности, не всегда могут произвести измерение в длинных шлицевых отверстиях.

Если учесть, что форма поперечного сечения шлица бывает прямоугольная, треугольная и эвольвентная с симметричным взаимным расположением относительно друг друга и относительно оси детали, то и контрольные приспособления должны обладать возможностями для контроля всех параметров.

В связи с этим, для повышения эффективности контроля боковых поверхностей шлицев создан ряд конструкций приспособлений для комплексного контроля шлицевого вала и отверстия [5, 6, 7].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шалыжин, К. А.** Обеспечение точности изготовления прямобоковых шлицевых соединений на основе прогнозирования оптимальных параметров технологической системы [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 : защищена 16.10.09 : утв. 30.12.09 / Шалыжин Кирилл Алексеевич. – Могилев, 2009. – 194 с.
2. Технологическое обеспечение качества ступенчатых валов и шлицевых соединений : монография / А. А. Жолобов [и др.]; под ред. А. А. Жолобова. – Смоленск, 2014. – 204 с.
3. **Трофимов, Б. Ф.** Расчет моментов инерции сечения шлицевых валов с эвольвентным профилем зубьев / Б. Ф. Трофимов // Вестник машиностроения. – 2004. – № 8. – С. 23–25.
4. **Феодосьев, В. И.** Сопротивление материалов : учебник для вузов / В. И. Феодосьев. – 9-е изд. перераб. – М. : Наука, 1986. – 512с.
5. **Пат. № 2136 РБ, МПК G 01B 3/00.** Устройство для контроля шлицевых валов [Текст] / М. Ф. Пашкевич, А. А. Жолобов, К. А. Шалыжин ; заявл : u20050066 от 14.02.05 ; опубл. 30.09.05.
6. **Пат. № 9167 РБ, МПК G 01B 3/00.** Устройство для контроля шлицевых валов [Текст] / А. А. Жолобов, В. А. Логвин, Е. Ю. Демиденко, А. О. Козлов ; заявл : u20120888 от 15.10.12 ; опубл. 30.04.13.
7. **Пат. № 9567 РБ МПК G 01B 3/00.** Устройство для контроля шлицевых отверстий [Текст] / А. А. Жолобов, Е. Ю. Демиденко, Ю. Н. Винкевич ; заявл : u20130209 от 11.03.13 ; опубл. 30.10.13.

