

УДК 621.91.01  
DOI: 10.12737/21424

**О.Н. Федонин**, д.т.н., **А.В. Хандожко**, д.т.н.,  
**А.Н. Щербаков**, к.т.н., **Л.А. Захаров**, к.т.н.,  
**Е.А. Польский**, к.т.н.

(Брянский государственный технический университет (БГТУ (БИТМ)),  
241035, РФ, г. Брянск, бул. 50-летия Октября, 7)  
E-mail: chandosh@yandex.ru

## **Проектирование металлорежущих станков с использованием унифицированных изделий**

*Изложены вопросы, связанные с проблемами проектирования металлорежущих станков на базе унифицированных деталей, узлов. Рассмотрены особенности проектных работ, новые задачи и пути их решения. Материал представлен на основе опыта проектирования и изготовления опытного образца шлифовально-заточного станка с ЧПУ.*

**Ключевые слова:** проектирование; обеспечение качества; точность металлорежущих станков.

**O.N. Fedonin**, D.Eng., **A.V. Khandozhko**, D.Eng.,  
**A.N. Shcherbakov**, Can.Eng., **L.A. Zakharov**, Can.Eng.,  
**E.A. Polsky**, Can.Eng.

(Bryansk State Technical University (BSTU (BIHE)),  
7, 50 Years of October Avenue, Bryansk 241035, RF)

## **Machine-tool design using common parts**

*This paper reports the peculiarities of metal-tool design with the wide use of finished common modules with a different degree of integration. Such an approach has found a wide use in practice abroad and develops intensively in domestic mechanical engineering. This current trend poses to engineers and scientists new tasks. A number of aspects of this problem is considered in the paper presented. The change of the modern enterprises structure, from technological potentialities, development of materials science, new technological capabilities and limitations are manifested in different forms. One of them is a trend to the application of nonconventional materials for system carriers. In the paper there are stated merits and demerits, the analysis of the experience in the reinforced concrete and organic concrete application for these purposes.*

*The problems of changes in design computations content are considered in the paper. In particular, by the example there is shown a necessity to solve problems connected with contact deformations. Other significant trend in computations – a versatile analysis of complex spatial dimensions successions complicating because of the growth of assembly number.*

**Keywords:** design; quality ensuring; machine-tool accuracy.

Проектирование технологического оборудования, в частности металлорежущих станков, является сложной задачей, решению которой всегда уделялось много внимания. В результате большого числа научно-технических работ была сформирована достаточно полная методика проектирования изделий этого типа. Но любые методики требуют постоянной корректировки в соответствии с изменениями в области материаловедения, машиностроения, технологии механической обработки, метрологическим обеспечением,

современными требованиями к технико-экономическим показателям и организации производственного процесса.

Характерной особенностью современного производства является постоянно углубляющаяся специализация производств. Это направление характерно и для станкостроения. Доля предприятий, работающих в рамках полного производственного цикла снижается, при увеличении предприятий, ориентированных на создание станков на базе унифицированных модулей различной степени интегра-

ции.

Одновременно наблюдается формирование производств и производственных объединений, специализирующихся на производстве унифицированных деталей, узлов, механизмов, устройств. Такая специализация ярко выражена для производства шарико-винтовых передач (ШВП), рельсовых направляющих, электродвигателей, поворотных механизмов. Это позволяет предприятиям увеличивать объемы выпуска продукции, переходить к хорошо технологически оснащённому крупносерийному и массовому производству.

Степень интеграции продукции широко варьируется от отдельных деталей до готовых к монтажу и подключению координатных осей (столов, головок). Продукция при этом выпускается в широком ассортименте как с точки зрения типоразмерных рядов, так и качества. В частности, те же ШВП выпускаются как для прецизионных станочных узлов, так и для транспортно-грузоподъемных устройств общего назначения, с соответствующим изменением точности и других параметров качества.

С учетом широкой кооперации, наличия на рынке готовых модулей, развития рынка услуг по изготовлению заготовок и их механической обработки производство станочного оборудования перестало быть нишей только для специализированных крупных предприятий полного цикла. Возникло значительное число небольших станкостроительных предприятий, которые в принципе не могут иметь у себя все технологические переделы — литье, объемную штамповку, гальванопокрытия и др. Специализация в ряде случаев доходит до превращения таких предприятий в только сборочные производства изделий, в том числе низкого качества. При этом ценовые характеристики, несовершенство законодательства по закупкам приводят к демпингу со стороны недобросовестных производителей как отечественных, так и зарубежных.

С учетом ошибок менеджмента, неправильной технической политики, требований антимонопольного законодательства такая продукция находит спрос. Особенно это опасно для оборудования, которое традиционно или по состоянию на текущий момент не выпускается в РФ. Примером являются шлифовально-заточные станки, в частности с ЧПУ.

Предприятия, в том числе работающие на оборонную промышленность, используют исключительно импортные станки. Это опасно для обеспечения экономической независимости

государства, что подтвердили санкции, принятые к нашей стране. Сегодня возникли трудности с приобретением некоторых моделей станков. Даже для оборудования, приобретаемого в Белоруссии, необходимо получать разрешение у Еврокомиссии для подключения пятой управляемой координаты. Поэтому для экономической и политической независимости страны, жизненно необходимо налаживание собственного производства качественных станков.

Новые возможности по созданию технологического оборудования в целом и металлообрабатывающих станков в частности создают не только предпосылки расширения круга производителей, но и проблемы при проектировании и производстве продукции высокого качества. При широком использовании покупных деталей и узлов, некотором ограничении технологических возможностей состав, порядок и объем проектных процедур меняются. Часть процедур исчезает, часть меняет объем и содержание, возникают и новые. Существующие методики проектирования, технологические рекомендации требуют определенных изменений и дополнений. Остановимся на некоторых, наиболее характерных и интересных тенденциях.

При использовании модульных решений возрастает роль компоновочного проектирования. В связи с этим определенное развитие требует методика анализа, созданная Ю.Д. Враговым. Растет актуальность поиска оптимального компоновочного решения. Благодаря модульности конструкции многие ограничения сегодня исчезли.

Существенно меняется подход к проектированию базовых деталей (станин, коробок). Значительная часть небольших машиностроительных заводов избавляются от литейного производства, особенно чугунолитейного. В связи с этим появились ограничения по доступности изготовления заготовок чугунных станин. В таких условиях возрастает интерес к альтернативам, таким как полимербетон, железобетон, гранит. Эти материалы в общем случае не могут заменить традиционные чугунные изделия, но в частных — крайне эффективны.

Разработанные швейцарскими машиностроителями в восьмидесятых годах 20 века полимербетонные станины нашли применение в станках повышенной точности. Полимербетон является композитом на основе смол и наполнителей. Обычно используют эпоксидные и полиэфирные смолы. Наполнители —

кварцевый песок, гранитный щебень, фарфоровые шарики и т.п. Возможны армирование станины.

Главное достоинство материала — отличные характеристики виброгашения. Полимерные композиты снижают вибрацию в 10 раз лучше чем чугун и в 45 раз лучше чем сталь. Прочностные характеристики некоторых композиций приближаются к чугуну, но в целом механические характеристики полимербетонных составов от соответствующих параметров чугуна не более 50 %.

Недостатками полимербетона в первую очередь является низкая температурная стойкость и относительно сложная технология получения качественных отливок. С температуры 70° С начинают терять свойства материалы на основе эпоксидных смол, со 140 °С — на основе полиэфирных. Но все-таки главные проблемы в технологии заливки. Тепловыделение, газовыделение, усадка при затвердевании, разный коэффициент теплового расширения арматуры и матрицы затрудняют получение качественных отливок. При получении качественных отливок обязательно применение вакуумных технологий и строгое соблюдение температурного режима.

Дополнительно нужно отметить высокую стоимость. Смолы в среднем стоят около 270 руб/кг, а импортные аналоги дороже в 2–3 раза. По сравнению с железобетоном полимербетон дороже почти на порядок и мало отличается от чугуна.

Железобетонные конструктивные элементы применяют достаточно давно и успешно при производстве крупногабаритных станков. Железобетон относительно технологичен, дешев, экологичен, доступен. Его удобно армировать, т.к. коэффициент теплового расширения стали и бетона отличаются незначительно. В последнее время при изготовлении бетонных конструкций успешно применяют арматуру из композиционных материалов. Механическая прочность качественного железобетона на сжатие практически равна прочности чугуна и выше чем у полимербетона. Вибрации он поглощает лучше чугуна хотя и хуже полимербетона.

Недостатками бетона является незначительная прочность при растяжении, возможность коррозии, изменение свойств во времени. Эти недостатки частично можно минимизировать за счет состава, правильного армирования, а также технологии заливки.

В случае перехода на названные выше конструкционные материалы, проектирование

стантин приобретает новое содержание. Это не только расчеты, связанные с оценкой прочности и жесткости конструкции, имеющие свою специфику, нехарактерную для станкостроения. Нужно решать задачи рационального размещения и закрепления закладных элементов с учетом необходимой дальнейшей чистой обработки присоединительных поверхностей.

В рамках проекта разработки и изготовления малогабаритного шлифовально-заточного станка с ЧПУ (5 управляемых координат) была опробована технология получения железобетонной станины (базовой плиты). Для снижения влияния органических недостатков железобетона были приняты ряд мер, в первую очередь, по оптимизации состава и технологии укладки. Деформации и разрушение материала, связанные с гигроскопичностью и наличием воды, решались двумя путями.

Во-первых, состав смеси был выполнен при минимально допустимом водоцементном соотношении — 0,3, а для улучшения удобоукладываемости был использован суперпластификатор и ускоритель набора прочности «Реламикс М-2». Это обеспечило качество бетона, существенно снизило пористость и гигроскопичность. Песок и щебень были тщательно промыты для удаления пылевых фракций, прокалены с целью точной оценки воды в бетоне. Щебень использовался двух фракций (5...10 и 15...20 мм), чтобы улучшить гранулометрический состав и повысить плотность бетона. Дополнительно для улучшения гидрофобных свойств предусмотрена окраска специальными красками.

Второй недостаток — низкая прочность на растяжение была компенсирована армированием. Использована сложная система армирования с применением отдельных линейных элементов, а также сетки. Был рассмотрен вопрос создания напряженного железобетона, разработана технология и оснастка для создания такой конструкции. Но расчеты показали, что для проектируемого станка прочность станины из железобетона достаточна даже без предварительного напряжения.

Работоспособность станины для возможных условий работы при растяжении можно повысить за счет несъемной стальной опалубки. Это решает проблемы хрупкости материала — края конструкции защищены от случайных ударов при изготовлении и эксплуатации, улучшаются и декоративные свойства изделия.

Были проработаны конструкторские и технологические вопросы, изготовлена необходимая оснастка. Опалубка выполнена в виде каркаса из листового металла. В опалубке установлена арматура, а также закладные элементы для монтажа узлов и деталей станка и транспортировки.

Арматура была закреплена резьбовыми соединениями к внешней опалубке, между собой в некоторых узлах скручены мягкой стальной проволокой. Сварочных соединений для уменьшения внутренних напряжений для крепления арматуры не применялось. Закладные элементы служат для установки рельсовых направляющих, опор ШВП, стойки, а также для ввинчивания опор и рым-болтов. Все они имеют анкерные элементы для надежного закрепления в бетоне. Между собой и с элементами арматуры они не связаны.

Были приняты меры для точного расположения закладных элементов по площади заливки. Плита отливалась на ровном основании лицевой стороной вниз. Закладные элементы точно по разметке были закреплены резьбовыми элементами на этом основании. Чтобы упростить последующую обработку привалочных плоскостей закладных элементов, они были приподняты относительно плоскости бетона. С этой целью на опорной поверхности были проложены подкладки из плотной бумаги и полиэтиленовой пленки, в местах установки закладных элементов прокладки были прорезаны. Это обеспечило выступание поверхностей, подлежащих обработке, над бетоном на 0,4 мм. Форма, подготовленная к заливке представлена на рис. 1.



Рис. 1. Опалубка с арматурой и системой закладных элементов

С целью повышения плотности и исключения пустот в процессе изготовления отливка подвергалась вибрационному воздействию. После затвердевания бетона (28 суток) все присоединительные поверхности были пришабрены, а нерабочие поверхности обработаны специальной краской. Результат представлен на рис. 2.

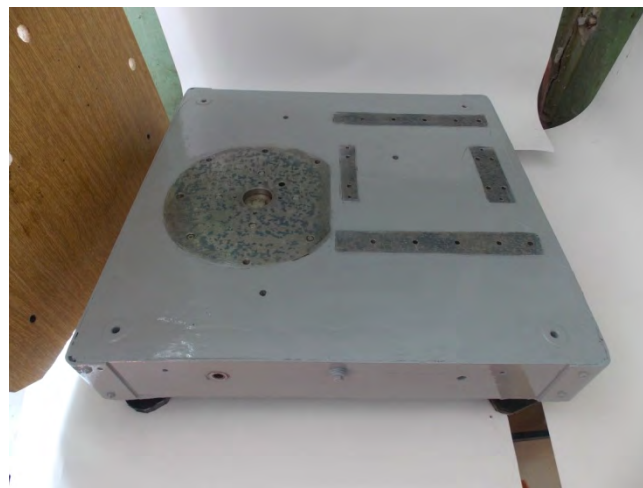


Рис. 2. Окрашенная плита с пришабренными базовыми элементами

Результаты испытаний образцов-свидетелей показали, что обеспечена прочность, превышающая прочность бетона марки 500, материал практически лишен пор.

Изменения появляются и в составе проектных расчетов. Снижается потребность в расчетах передаточных механизмов, частично несущей системы, которые приобретаются в виде готовых конструктивных решений с заранее заданными характеристиками. При этом резко возрастает роль расчетов размерных цепей, в том числе пространственных и с учетом контактных деформаций.

Из работ Д.Н. Решетова, Э.В. Рыжова, А.Г. Суслова известно, что даже для традиционных станков контактные деформации составляют от 40 до 90 % от общих перемещений их узлов. Для модульных конструкций число стыков резко возрастает. В связи с этим важность проблемы обеспечения контактной жесткости также растет. Проявляется эта проблема двояко. Необходимо как правильное регламентирование технических требований к материалу стыков, размерам и качеству поверхностного слоя, так и технологические решения по обеспечению заданных характеристик стыка. Еще более интересным было бы одноступенчатое решение задачи: определение условий обработки, обеспечивающих требуемую величину контактных деформаций.

Необходимо отметить актуальность расчетов контактной жесткости не только для оценки эксплуатационных характеристик станка. Оценка контактных перемещений нужна для определения некоторых исполнительных размеров. Характерный пример представлен на рис. 3, где упрощенно показана часть конструкции одной из линейных координат станка.

На плоскости станины 1 монтируются проставки 2 под рельсовые направляющие 3 (правая рельсовая направляющая на рисунке не показана) и подшипниковые опоры для винта ШВП 4. По рельсовым направляющим движутся каретки рельсовых направляющих 5. Стол 6 устанавливается на плоскости кареток и корпуса гайки ШВП 7.

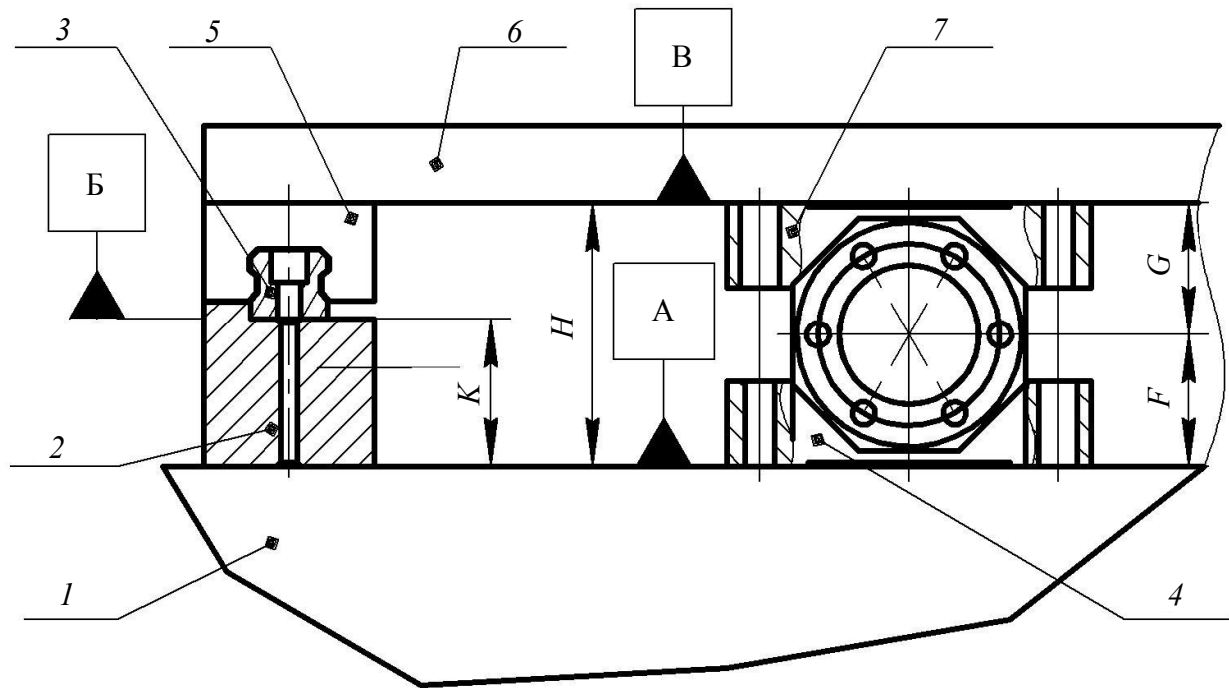


Рис. 3. Схема размерной цепи для расчета размеров с учетом контактных деформаций

При этом плоскости комплекта кареток (в комплекте не менее двух, чаще четырех, возможно и более) и корпуса гайки ШВП должны точно совпадать, чтобы обеспечить нормальный контакт с опорной плоскостью стола. Одновременно нужна параллельность рельсовых направляющих и оси ШВП. Возникает сложная пространственная размерная цепь. Если пренебречь постоянством размера  $K$  — высотой опорной поверхности левой и правой проставок под рельсы, угловой погрешностью их расположения в горизонтальной плоскости то задачу можно упростить перенеся на плоскость. Замыкающим размером для данной схемы в первом приближении можно считать размер  $G$  от оси корпуса гайки ШВП до привалочной плоскости.

Затяжка стыков «проставка – станина», «опора подшипника ШВП – станина», «рельс – проставка», «каретка – стол», «корпус гайки ШВП – стол» создает контактные перемеще-

ния, которые должны быть учтены при назначении размера  $G$ . Эксперименты показали, что первое нагружение стыка «рельс – пришабренная проставка» дает контактные деформации до 0,03 мм, повторные – от 0,01 до 0,017 мм. Один из способов расчета размера для такой схемы рассмотрен в [2].

Наличие в размерной цепи более 10 стыков, работающих параллельно-последовательно, приведет к значительным погрешностям, если не принять меры по минимизации и стабилизации контактных деформаций. Поэтому технологическое обеспечение качества в этой ситуации имеет важное значение. Для стабилизации деформации необходимо как постоянное значение крутящего момента затяжки крепежных винтов, так и минимальный разброс параметров качества поверхностного слоя сопрягаемых поверхностей. Эксперименты показали, что колебание величины крутящего момента, прилагаемого к головке винта

более чем на 25 %, приводит к значимому изменению соответствующих контактных деформаций.

Шероховатость стыков мала, но ее обеспечение обычно не создает проблем — современные шлифовальные станки легко обеспечивают этот параметр. Больше проблем создают волнистость и макроотклонения. Даже очень аккуратное многократное шлифование не гарантирует отсутствия волнистости, крат-но превышающей шероховатость.

Макроотклонения связаны в основном с наличием внутренних остаточных напряжений. Причем, они могут присутствовать даже у покупных изделий производителей с хорошей репутацией. Изделия эти нежесткие, термообработаны. При этом любые нарушения в технологии термической и (или) механической обработки приводят к наличию нестабильных структур, которые будут распадаться, что сопровождается появлением макроотклонений. Поэтому для значительного круга станочного оборудования сегодня невозможно отказаться от операций по ручной пригонке (шабрение, притирка) отдельных стыков.

Важную роль в обеспечении точности станков играет принятая модель управления станком. Современные системы ЧПУ позволяют существенно снизить требования к точности механической системы. Алгоритмы повышения точности, применяемые на координатно-измерительных машинах, все чаще применяют в металлорежущих станках. Один из вариантов, заключающийся в сканировании зоны обработки, сравнении показания датчиков линейных перемещений с теоретическими значениями и внесением корректирующих перемещений, относительно просто реализуется на металлорежущем оборудовании [2, 3].

Подводя итоги, можно сказать, что сегодня, благодаря доступности станочных модулей различных типоразмеров и характеристик, расширились возможности новых, в том числе малых предприятий по разработке и изготовлению металлорежущих станков. Однако это

направление работ пока не в полной мере обеспечено с научно-методической точки зрения. Не в полной мере используются нетрадиционные материалы и технологии. Тем не менее, по мере решения этих задач, указанное направление будет развиваться, вероятнее всего это развитие будет опережать традиционно сложившиеся подходы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Польский, Е.А., Филькин, Д.М. Модель комплексного анализа размерных связей для обеспечения точности сборочных соединений // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2009. – №5/277 (576). – С. 59–66.
2. Петрешин, Д.И., Федонин, О.Н., Федоров, В.П., Хандожко, А.В., Хандожко, В.А. Расширение функциональных возможностей металлорежущих станков с ЧПУ путем организации связи между ПЭВМ и УЧПУ при построении адаптивной системы управления // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2011. – № 4. – С. 4–9.
3. Федонин, О.Н., Петрешин, Д.И., Хандожко, В.А., Агеенко, А.В. Повышение точности токарных станков с ЧПУ // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2012. – № 5(11). – С. 36–43.

## REFERENCES

1. Polsky, E.A., Filkin, D.M. Model of complex analysis of dimensions ties for accuracy ensuring in assembly units // Proceedings of OrelSTU. Set “Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology”. – 2009. – №5/277 (576). – pp. 59–66.
2. Petreshin, D.I., Fedonin, O.N., Fyodorov, V.P., Khandozhko, A.V., Khandozhko, V.A. Functional potentialities expansion in NC machine-tools through organization of ties between PCs and NCD at formation of control adaptive system // Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2011. – № 4. – pp. 4–9.
3. Fedonin, O.N., Petreshin, D.I., Khandozhko, V.A., Ageyenko, A.V. Accuracy increase in NC lathes // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2012. – № 5(11). – pp. 36–43.

Рецензент д.т.н. Б.М. Бржозовский

