

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ОЦЕНКИ ЕГО РАБОТОСПОСОБНОСТИ**

А. В. Липов, Г. С. Большаков, П. Г. Павловский, Р. И. Мамин

**COMPUTER MODELING OF MACHINE TOOLS
FOR THE EVALUATION OF ITS EFFICIENCY**

A. V. Lipov, G. S. Bolshakov, P. G. Pavlovski, R. I. Mamin

Аннотация. *Актуальность и цели.* Применение компьютерного моделирования станочного оборудования позволяет на стадии его проектирования без изготовления опытного образца определять недостатки его конструкции и разрабатывать мероприятия по их устранению. Цель – повышение эффективности проектирования станочного оборудования. *Материалы и методы.* Предложено для компьютерного моделирования станочного оборудования использовать программное обеспечение *SolidWorks* с различными приложениями. Приняты обоснованные допущения при разработке трехмерных моделей узлов, позволяющих проводить оценку величин их упругих и температурных деформаций, динамические смещения элементов, а также тепловые и прочностные расчеты. *Результаты.* Разработаны трехмерные модели узлов конкретных станков и проведены соответствующие расчеты. *Выводы.* Полученные результаты позволяют на стадии проектирования станочного оборудования оценивать их работоспособность, а в случае необходимости разрабатывать мероприятия по совершенствованию конструкции их узлов.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, станочное оборудование, трехмерные модели, упругие и температурные деформации, динамические смещения, тепловые и прочностные расчеты.

Abstract. *Background.* The use of computer simulation of machining equipment allows at the stage of its design, without manufacturing a prototype, to determine the limitations of its design and to develop actions to eliminate them. The aim is to increase the productivity of machine tools. *Materials and methods.* Proposed for computer simulation of machine equipment to use the *SolidWorks* software with a variety of applications. Adopted reasonable assumptions in the development of three-dimensional models of nodes, allowing to assess the values of their elastic, temperature deformations, dynamic displacement elements as well as thermal and strength calculations. *Results.* Developed 3D models of host specific machine and appropriate calculations. *Conclusions.* The results obtained in the design stage of machine-tool equipment to evaluate their performance, and, if necessary, to develop actions for improving the design of their sites.

Key words: computer simulation, machine tool equipment, 3D models, elastic and thermal deformation, dynamic bias, thermal and strength calculations.

Введение

Использование станочного оборудования на машиностроительных предприятиях в современных условиях характеризуется некоторыми его особенностями, присущими ему как при проектировании, так и при эксплуата-

ции. При проектировании необходимо не только учитывать наличие в конструкции оборудования вспомогательных механизмов (магазинных инструментов, столов-палет, манипуляторов и др.), но и расширение его технологических возможностей, например, применение многооперационной обработки (сверлильно-фрезерно-расточные станки, токарно-фрезерные и др.). Высокая стоимость, а также необходимость оперативного ввода в эксплуатацию не позволяют изготавливать опытные образцы такого оборудования, проводить их эксплуатационные испытания и на основе их результатов разрабатывать рекомендации по совершенствованию конструкций.

Все вышеуказанное требует необходимости проведения сложных расчетов как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации. Такие расчеты по общеизвестным методикам с использованием аналитических зависимостей являются весьма приближенными, а в некоторых случаях и невозможными.

Наиболее распространенные программные средства для компьютерного моделирования станочного оборудования

Для оценки влияния условий работы станочного оборудования на такие показатели, как точность, производительность и др., в современных условиях можно использовать программные средства *SolidWorks*, КОМПАС-3D, ANSYS и др., в основе которых лежит метод конечных элементов. Эти программные средства относятся к современным системам автоматизированного проектирования и имеют в своем составе различные приложения, которые применяются для проектирования, технологической подготовки производства и возможного электронного управления и создания технической документации.

Одним из наиболее распространенных программных средств, которое используется при проектировании и анализе работы станочного оборудования, является *SolidWorks*. Входящие в его состав приложения *SolidWorks Simulation*, *SolidWorks Motion*, *SolidWorks Routing* и др. позволяют выполнять силовые, тепловые, динамические расчеты узлов станочного оборудования, расчет их гидравлических и пневматических схем, а также прокладывать трубопроводы и оптимизировать их конструкции. Одним из основных этапов проведения таких расчетов является разработка трехмерной компьютерной модели станочного оборудования или его узлов. При разработке такой модели принимаются определенные допущения, которые не должны влиять на результаты требуемых расчетов.

Станочное оборудование отличается от других видов технологического оборудования сложностью конструкции и высокими требованиями к точности взаимного расположения узлов, несущих инструмент и заготовку, что определяет точность обработки деталей. При работе станочного оборудования появляются упругие и температурные деформации, а также динамические смещения его узлов, которые могут значительно влиять на точность и качество обработки. Упругие деформации возникают под действием силы резания, усилий от приводных элементов и т.д., температурные – от различных источников тепла (процесса резания, электродвигателей, механических пере-

дач, подшипников и т.д.), динамические смещения – от колебательных процессов, возникающих в станочном оборудовании при его работе.

Оценка возможности расчета упругих и температурных деформаций элементов станков

Была проведена оценка возможности применения приложения *Solid-Works Simulation* для расчета упругих и температурных деформаций, а также динамических смещений узлов станочного оборудования, возникающих при его работе. При разработке трехмерной компьютерной модели станочное оборудование или его узлы представляются в виде сборки трехмерных твердотельных деталей, к которым добавляются различные ограничения (крепления, соединения и др.) и прикладываются внешние возмущения (усилия резания, нагрузки от приводных элементов, тепловая мощность источников тепла, исследуемый частотный диапазон и т.д.) [1].

При расчете упругих деформаций узлов станочного оборудования были приняты следующие допущения: действующие нагрузки от силы резания, а также нагрузки, возникающие от вращения неуравновешенных элементов приводов, принимаются статическими, при этом не учитываются деформации, связанные с нагревом деталей. Исходными данными для расчета являются: величины вышеуказанных нагрузок, геометрические размеры исследуемых узлов, материалы нагружаемых деталей, виды шпиндельных опор, коэффициенты трения и контактной податливости.

В качестве примера был проведен расчет упругих деформаций вершины резца и заготовки, закрепленной в трехкулачковом патроне, при обработке на малогабаритном токарном станке [2]. Расчет деформаций проводился относительно продольных направляющих станка в направлении осей X, Y и Z. Трехмерные модели шпиндельной бабки с заготовкой и суппорта приведены на рис. 1.

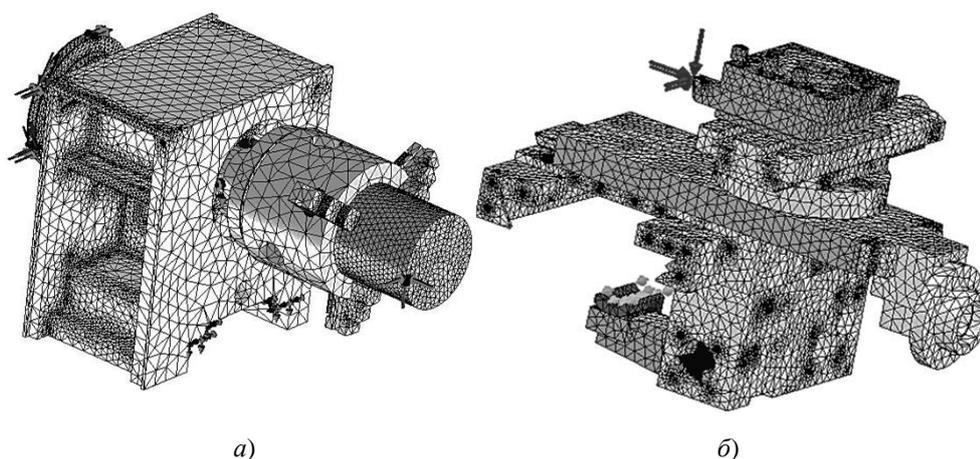


Рис. 1. Трехмерные модели шпиндельной бабки (а) и суппорта (б) малогабаритного токарного станка

При токарной обработке наибольшее влияние на точность оказывают деформации в направлении оси X . На рис. 2 в виде эпюры приведены результаты расчетов в этом направлении и ее характерные участки. При этом участок 1 характеризует смещение заготовки в трехкулачковом патроне и ее деформацию; 2 – смещение и деформацию патрона; 3 – деформацию шпинделя; 4 – смещение шпинделя в результате податливости опор и корпуса шпиндельной бабки; 5 – деформацию шпинделя от приводного элемента (ременной передачи). На участках 1 и 2 смещение составляет 4,5 мкм, на участке 3 – 12 мкм, на участке 4 – 2 мкм. Участок 5 не оказывает влияния на точность обработки. Общая величина деформации переднего конца заготовки составляет 18,5 мкм. Из результатов расчетов видно, что наибольшее влияние на точность обработки оказывает деформация шпинделя (около 64 % от общего смещения), величина которой может быть снижена за счет повышения его жесткости.

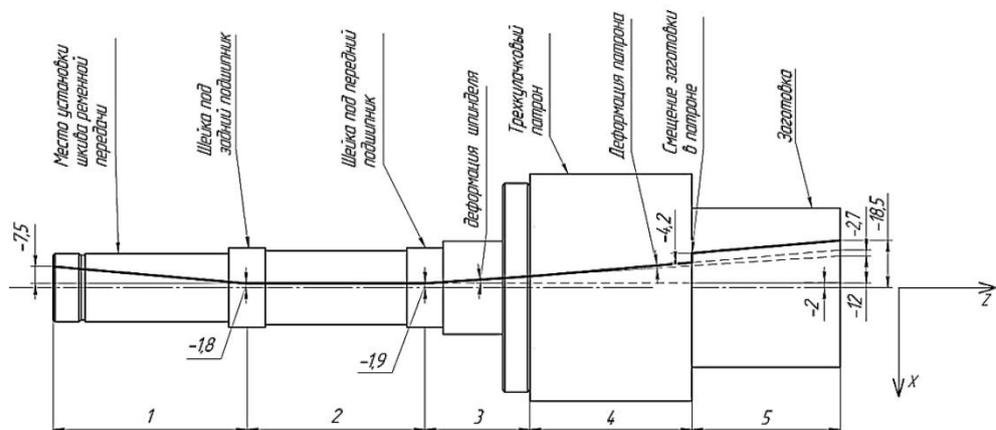


Рис. 2. Эпюра распределения деформаций шпинделя, патрона и заготовки по оси X

По оси Y происходит деформация заготовки вверх на величину 73,18 мкм.

На рис. 3 приведена схема упругих деформаций элементов исполнительного узла привода подач с закрепленным инструментом (резцом) в направлении оси X под действием радиальной и касательной составляющих усилия резания. Общая величина деформаций вершины резца в этом направлении составляет 1,4 мкм. В направлении оси Y происходит ее деформация вниз на величину 2,8 мкм.

На рис. 4 приведена схема для определения суммарных упругих деформаций заготовки и инструмента от начального положения в процессе обработки. Установлено, что погрешность обработки в радиальном направлении, вызванная упругими деформациями элементов технологической системы, составляет величину 24,9 мкм. При этом большая часть возникающей погрешности обусловлена податливостью шпиндельного узла и может быть уменьшена повышением его жесткости.

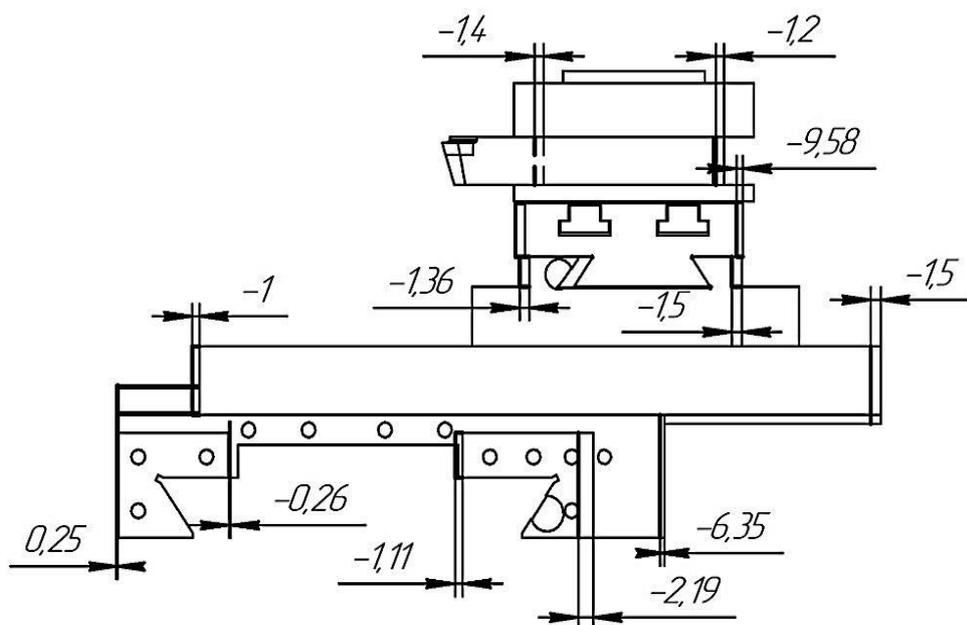


Рис. 3. Деформации элементов исполнительного узла привода подач по оси X

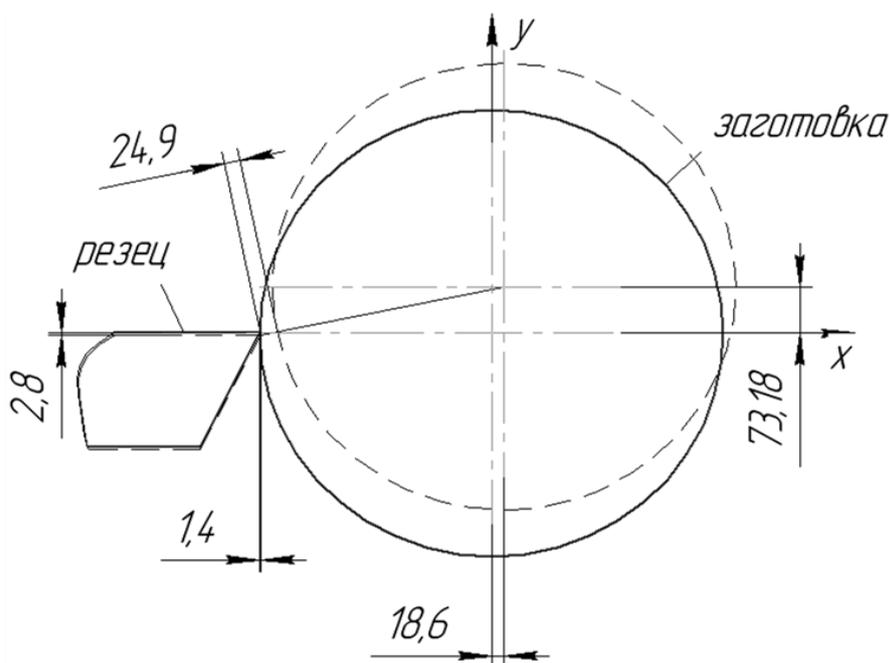


Рис. 4. Деформации заготовки и резца под действием силы резания по оси X

Температурные деформации элементов узлов могут оказывать значительное влияние на точность обработки на станочном оборудовании, особенно на прецизионном и автоматизированном. Эти деформации возникают и изменяются при работе до наступления установившегося теплового режима, т.е. до состояния, при котором температура элементов оборудования не из-

меняется, а следовательно, не изменяются и температурные деформации. При этом, зная величину таких деформаций, можно вводить автоматическую коррекцию на положение инструмента или заготовки при обработке.

При расчете температурных деформаций принимается допущение о том, что узлы оборудования подвержены только воздействию тепловой энергии от источников тепла, которая определяется через потери передаваемой мощности привода или по известным методикам. При этом задаются способы отвода тепла (конвекция и излучение), которые характеризуются температурой окружающей среды и коэффициентами интенсивности протекания этих процессов. Исходными данными для расчетов являются: величины потерь в приводах узлов, их геометрические размеры, материалы деталей и характеристики способов отвода тепла. Расчеты могут проводиться как для переходного, так и установившегося тепловых режимов.

В качестве примера был проведен расчет температурных деформаций элементов шпиндельного узла сверлильно-расточного станка при его работе [3]. Трехмерная модель этого узла приведена на рис. 5.

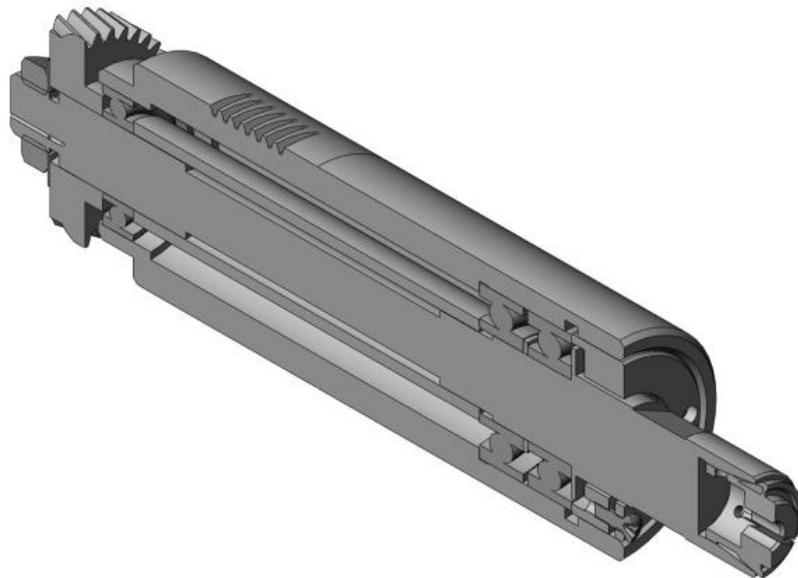


Рис. 5. Трехмерная модель шпиндельного узла сверлильно-расточного станка

Расчет деформаций проводился для переднего конца шпинделя в направлении вдоль его оси, как наиболее влияющего на точность обработки на данном станке. Источниками тепла в узле являются зубчатое зацепление и подшипники. В качестве начальной принималась температура 20 °С.

Расчет при установившемся режиме работы шпинделя показал, что температура его отдельных участков может достигать 100 °С, а деформация его переднего конца составляет 115 мкм.

На рис. 6 приведена зависимость величины деформации переднего конца шпинделя от времени работы в переходном режиме. Время расчета составляло 240 с при шаге 30 с.

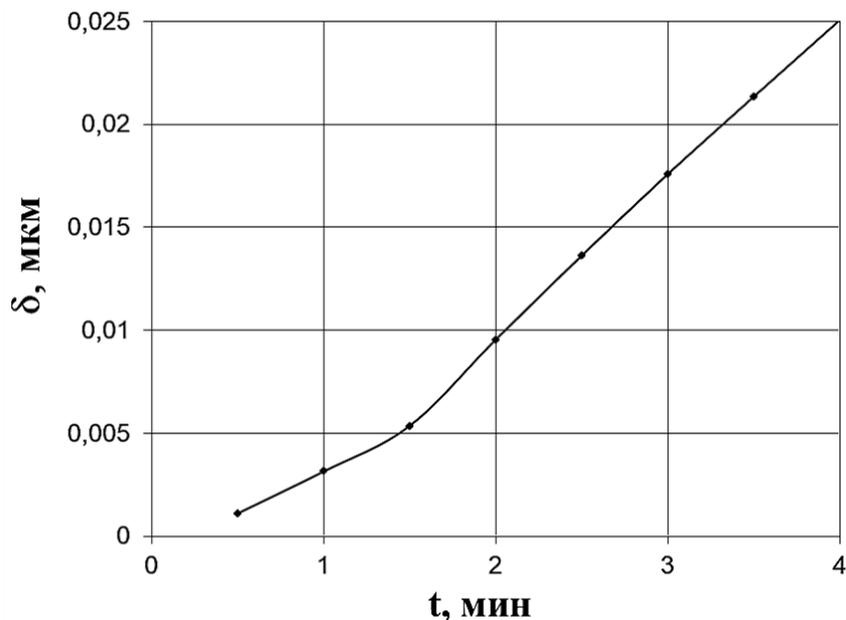


Рис. 6. Зависимость деформации переднего конца шпинделя вдоль его оси (δ) от времени работы сверлильно-расточного станка (t)

Из приведенной зависимости видно, что при работе станка в течение 4 минут величина анализируемой деформации составляет 25 мкм и его шпиндель не выходит на установившийся тепловой режим. Однако через 1,5 минуты исследуемая зависимость становится линейной, что позволяет вводить автоматическую коррекцию положения инструмента или заготовки при обработке. Следует отметить, что расчет времени выхода станка на установившийся тепловой режим является специфической задачей, поскольку его величина зависит от конкретных условий работы оборудования (чередования различных видов и режимов обработки, времени его простоя, связанного со сменой инструмента и заготовки, и др.).

Динамические смещения узлов станочного оборудования при его работе могут оказывать существенное влияние как на точность, так и на качество обрабатываемых поверхностей. Предложено их расчет проводить в два этапа: на первом определять собственную частоту колебаний узлов, на втором – наибольшие амплитуды их колебаний.

Расчет динамических смещений с использованием программного приложения *SolidWorks Simulation* был проведен на примере шпиндельного узла токарного станка [4]. При расчетах были приняты следующие допущения: не учитываются приводные элементы и передаваемая от них нагрузка на шпиндель; шпиндельные опоры задаются их радиальной и осевой жесткостями; не учитывается наличие патрона; шпиндель считается неподвижным, а действующая на него нагрузка от сил резания изменяется по гармоническому закону. Исходными данными для расчета являлись геометрические размеры шпиндельного узла и его элементов, их материал, действующие нагрузки и исследуемый частотный диапазон.

Установлено, что собственная частота шпинделя составляет 432 Гц. На такой частоте в станочном оборудовании обычно не возникает интенсивных динамических нагрузок [5]. Наибольшие динамические смещения возникают на частоте в 1 Гц, и их амплитуда составляет 4,3 мкм.

При использовании программного средства *SolidWorks* можно определять не только погрешности положения инструмента и заготовки, оказывающие влияние на точность обработки, но и другие параметры станочного оборудования, которые влияют на такие показатели его работоспособности, как надежность, производительность и др.

При проведении тепловых расчетов шпиндельной бабки сверлильно-расточного станка установлено, что при его работе происходит изменение диаметров посадочных отверстий под подшипники шпиндельного узла [3]. Под передний подшипник диаметр шпинделя увеличивается на 31 мкм, а диаметр его корпуса – на 13 мкм, для заднего подшипника соответственно – на 26 мкм и 22 мкм, что необходимо учитывать при назначении величин предварительных натягов при проектировании шпиндельного узла. При этом чрезмерное увеличение величины натяга в подшипнике может привести к его заклиниванию и созданию аварийной ситуации, а ее снижение – к увеличению податливости шпиндельного узла и потере точности станочного оборудования.

Оценка возможности проведения прочностных расчетов элементов станков

Использование патронов с термозажимом для крепления инструмента обеспечивает более высокую точность обработки. Обычно патрон представляет собой оправку, устанавливаемую в шпинделе, с отверстием для базирования и зажима инструмента. Предварительно патрон нагревают и выдерживают при определенной температуре, обеспечивающей возможность установки хвостовика инструмента в отверстие. Затем патрон вместе с инструментом охлаждают для создания натяга, определяющего величину усилия зажима. При этом недостаточная ее величина может привести к аварии при обработке, а чрезмерная – к пластическим деформациям на поверхности хвостовика и, соответственно, проблематичности дальнейшего использования инструмента.

Современные индукционные машины с различными видами охлаждения (воздушным, водяным, с применением хладагента) и системами управления и коррекции температур позволяют избежать указанные недостатки, но значительная их стоимость и широкая номенклатура инструмента и оснастки ограничивают их применение.

Предложено для определения необходимых режимов нагрева и охлаждения (времени и температуры) использовать приложение *SolidWorks Simulation* и расчет проводить в два соответствующих этапа с температурным исследованием переходных процессов [6].

Исходными данными для расчетов являются: геометрические размеры инструмента и патрона с допусками на посадочные размеры, их материалы и

температуры помещений, где закрепляют инструмент и применяют его при обработке.

После температурных расчетов выполняется статическое исследование, в результате которого определяются контактные давления в стыке между патроном и хвостовиком инструмента. На рис. 7 приведена векторная эпюра распределения контактного давления в стыке между хвостовиком инструмента и патроном. После этого проводится расчет полученного усилия зажима, величину которого сравнивают с требуемой. В том случае, когда эта величина отличается от требуемой в большую или меньшую сторону, переходят к повторению расчетов с определенным шагом, уменьшая или увеличивая температуру и (или) время нагрева.

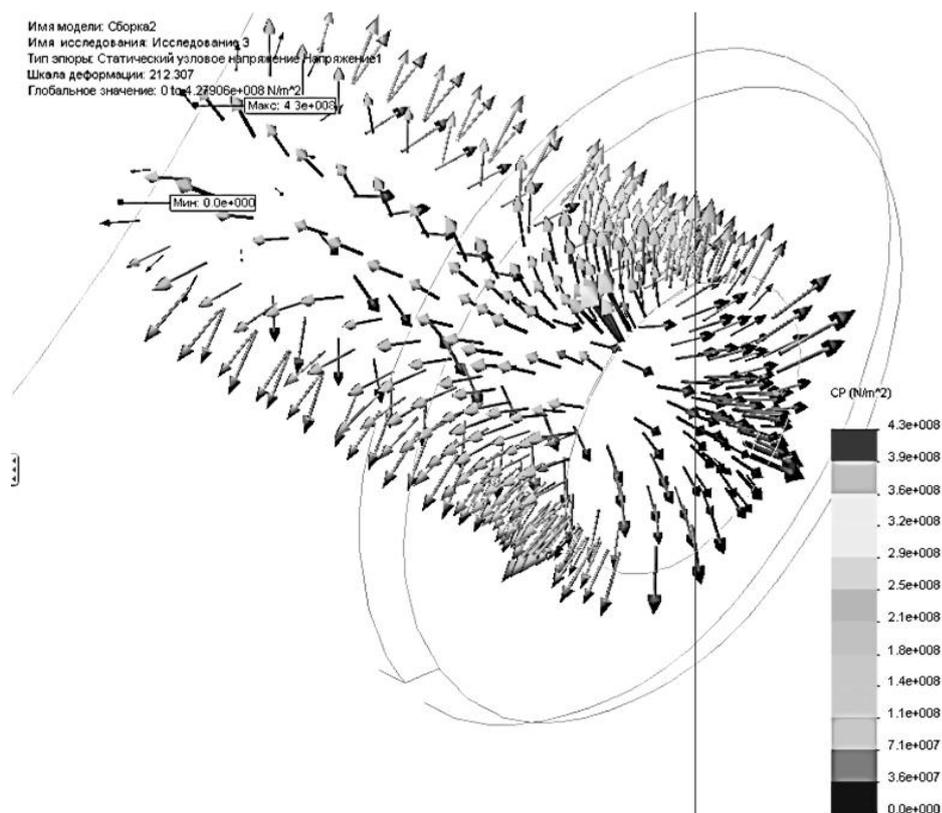


Рис. 7. Векторная эпюра распределения контактного давления в стыке между хвостовиком инструмента и патроном

Проведенные расчеты усилия зажима для сверла $\varnothing 6h6$ показали, что на основании рекомендаций по использованию конкретной модели индукционной машины создаваемые усилия могут в десятки раз превышать величины, необходимые для предельно возможных режимов резания данного инструмента.

Одним из резервов повышения производительности автоматизированного станочного оборудования является повышение скорости перемещения его узлов на холостых ходах. Однако это приводит к увеличению динамиче-

ских нагрузок, действующих на его элементы и стыки между ними, которые могут привести к преждевременному ремонту оборудования.

Для оценки работоспособности оборудования при динамическом режиме можно использовать приложение *SolidWorks Motion*. При этом расчеты проводятся в несколько этапов. На предварительном этапе в *SolidWorks* разрабатывается трехмерная модель узла с учетом вышеприведенных рекомендаций и допущений, которая передается в приложение *SolidWorks Motion*. На следующем этапе определяются параметры работы узла (положение, скорость, ускорение отдельных его элементов, силы, действующие на них во время работы, а также нагрузки на приводном двигателе) для каждого шага расчета, которые отображаются в виде зависимости определенного параметра от времени. При этом действующие на каждый элемент нагрузки определяются путем перерасчета характеристик приводного двигателя. На следующем этапе выполняется расчет на прочность отдельных элементов узла. Результатом расчета являются величины напряжений и деформаций, по которым анализируется работоспособность узла.

В качестве примера был проведен расчет работоспособности револьверной головки с мальтийским крестом для ее переключения [7]. Исходными данными для расчета являлись геометрические размеры узла и его элементов, их материалы, время переключения револьверной головки для смены инструмента и характеристики приводного двигателя.

Установлено, что наиболее нагруженным элементом является мальтийский крест. При этом наибольшие напряжения в нем возникают во время отвода револьверной головки, т.е. когда кривошип попадает в паз мальтийского креста.

На рис. 8 приведено распределение напряжений в детали в этот момент.

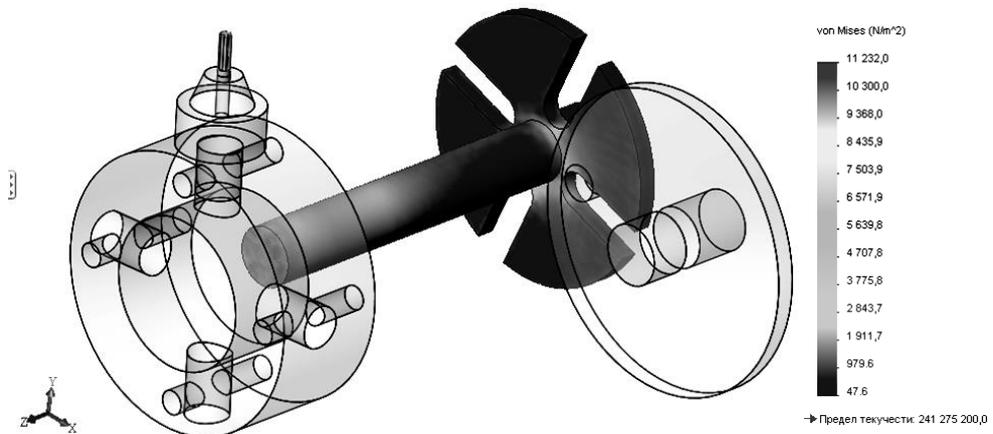


Рис. 8. Распределение напряжений в мальтийском кресте револьверной головки

Из рисунка видно, что возникающие напряжения в мальтийском кресте значительно меньше предела текучести ее материала. Данная конструкция и габаритные размеры револьверной головки с учетом применяемых значений коэффициентов запаса 2–3 позволяют уменьшить время ее переключения на 30–40 %. Кроме того, разработанная модель револьверной головки позво-

ляет при ее проектировании для конкретного оборудования выбирать материал деталей и их геометрические размеры с позиций уменьшения габаритов и материалоемкости узла.

Заключение

Результаты компьютерного моделирования станочного оборудования позволяют сравнивать между собой различные компоновки станков и их узлов на стадии проектирования и выбирать лучшие варианты по требуемым показателям.

Однако численные значения деформаций, смещений, температур и других характеристик требуют экспериментальных проверок. Это связано с тем, что при расчетах принимаются некоторые данные, имеющие широкий диапазон изменений (жесткостные, температурные и другие характеристики).

Библиографический список

1. Алямовский, А. А. Инженерные расчеты в *SolidWorks Simulation* / А. А. Алямовский. – 2-е изд. – М. : Изд-во ДМК Пресс, 2015. – 464 с.
2. Большаков, Г. С. Модель упругих деформаций токарного станка в системе *SolidWorks* / Г. С. Большаков, П. Г. Павловский, А. Д. Агеев // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – № 1 (2). – С. 129–133.
3. Липов, А. В. Исследование влияния упругих и температурных деформаций шпиндельной бабки на ее работоспособность / А. В. Липов, Г. С. Большаков, Д. А. Матвеев // Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами *CAD/CAM/CAE/PDM* : сб. ст. IX Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : ПДЗ, 2015. – С. 55–59.
4. Липов, А. В. Динамический анализ шпиндельного узла токарного станка / А. В. Липов, Г. С. Большаков // Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами *CAD/CAM/CAE/PDM* : сб. ст. VII Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : ПДЗ, 2013.
5. Станочное оборудование автоматизированного производства : учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / А. А. Аврамов, В. В. Бушуев, Н. Н. Верейкин ; под ред. В. В. Бушуева. – М. : Станкин, 1993. – Т. 1. – 584 с.
6. Липов, А. В. Методика определения условий крепления инструмента в патронах с термозажимом / А. В. Липов, Г. С. Большаков, В. В. Панчурин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – № 4 (12). – С. 124–128.
7. Липов, А. В. Компьютерная модель револьверной головки токарного автомата / А. В. Липов, Г. С. Большаков, В. В. Панчурин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – № 2 (6). – С. 160–163.

Липов Александр Викторович

кандидат технических наук, доцент
заведующий кафедрой компьютерного
проектирования технологического
оборудования,
Пензенский государственный университет
E-mail: mrs@pnzgu.ru

Lipov Alexander Viktorovich

candidate of technical sciences,
associate professor,
head of sub-department of computer aided
design of technological equipment,
Penza State University

Большаков Герман Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра компьютерного проектирования
технологического оборудования,
Пензенский государственный университет
E-mail: mrs@pnzgu.ru

Bolshakov German Sergeyevich

candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of computer aided design
of technological equipment,
Penza State University

Павловский Павел Геннадьевич

старший преподаватель,
кафедра компьютерного проектирования
технологического оборудования,
Пензенский государственный университет
E-mail: mrs@pnzgu.ru

Pavlovski Pavel Gennadyevich

senior lecturer,
sub-department of computer aided design
of technological equipment,
Penza State University

Мамин Ринат Исмаилович

студент,
Пензенский государственный университет
E-mail: mrs@pnzgu.ru

Mamin Rinat Ismailovich

student,
Penza State University

УДК 621.9.06 (07)

Липов, А. В.

Компьютерное моделирование станочного оборудования для оценки его работоспособности / А. В. Липов, Г. С. Большаков, П. Г. Павловский, Р. И. Мамин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 4 (24). – С. 143–154.