

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ПОТРЕБНЫХ СИЛ
ЗАЖИМА ЗАГОТОВОК В ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ УСЛОВИЯХ ОБРАБОТКИ**

© 2018 Ю.И. Кургузов

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 25.06.2018

Изменяющиеся условия характерны для современных многофункциональных станков с ЧПУ при обработке в рамках выполнения одной технологической операции с одного установка закреплённой в приспособлении заготовки различными инструментами в нескольких её позициях. В процессе обработки заготовка претерпевает существенные изменения своих геометрических размеров, её жёсткость также изменяется. В результате возникают упругие деформации, приводящие к снижению точности обрабатываемых поверхностей. С целью получения требуемой точности при изготовлении детали необходимо управлять силой зажима. Но для этого сначала должна быть определена необходимая сила, которая затем обеспечивается механизмом зажима. В типовой для станков с ЧПУ правой системе координатных осей предложен обобщённый вид уравнений равновесия действующих в пространстве на абсолютно твёрдую заготовку активных сил и моментов сил, в которых направления их действия выражены переменными направляющими косинусами, а реакция опоры является потребной силой зажима. В отличие от существующих в настоящее время представлений учитывается, что согласно закону независимости действия сил каждая из них вносит свой вклад в величину искомого силы зажима. Сила зажима является результирующей силой, составленной как из полной реакции опоры, так и из пар сил, возникающих от действия на опору моментов сил. На примере фрезерной и токарной обработки заготовки, закреплённой соответственно в машинных тисках и в трёхкулачковом патроне, приведена общеизвестная, но не применяемая в полном объёме при расчёте приспособлений методика, связанная с особенностями определения действующих на заготовку сил резания, трения, зажима и места их приложения. При этом показано, что в ряде случаев целесообразно для упрощения решения действующую на обрабатываемую заготовку систему сил заменять эквивалентной системой. В расчётную схему и в уравнения равновесия введены не только расстояния от места приложения активных сил до места закрепления заготовки, но и (в зависимости от условий обработки) размеры, относящиеся либо к зажимным элементам приспособления, либо к закрепляемым поверхностям заготовок. Соотношения между этими размерами оказываются вполне определёнными коэффициентами при силах резания, являющимися частью (или одним из множителей, зависящим от несовершенства расчётной схемы) субъективно назначаемого и изменяющегося в широких пределах коэффициента запаса.

Ключевые слова: уравнения равновесия, направляющие косинусы, контроль силы зажима, эквивалентная система сил, жёсткая заделка, пространственная расчётная схема сил, момент трения на плоской опоре, реактивные моменты сил, суммарная сила зажима.

ВВЕДЕНИЕ

Современные цифровые технологии с каждым годом всё глубже проникают в производственную сферу. Внедрение этих технологий в машиностроение связано, в частности, с широким применением станков с ЧПУ. Основным элементом программного обеспечения такого металлорежущего оборудования является устройство числового программного управления станочными приводами с разветвлённой измерительной системой, содержащей цифровые проводные и беспроводные датчики обратной связи, позволяющие не только контролировать ход технологического процесса, но и диагностировать состояние оборудования и режущего инструмента.

*Кургузов Юрий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения.
E-mail: tms@samgtu.ru*

Использование станков с ЧПУ в производстве существенно изменяет технологическую подготовку производства, требует от разработчиков более глубоких знаний в области математики, механики, программирования, электроники, понимания принципов действия связанных между собой автоматизированных блоков и устройств.

Особенностью обработки на многофункциональном станке с ЧПУ является то, что операция выполняется за один установ, несколько инструментальных переходов и в нескольких позициях заготовки. При этом обработка различных по форме поверхностей заготовки производится в одном и том же станочном приспособлении, удовлетворяющем требованиям обеспечения точности её изготовления, неподвижности или квазистатического относительного перемещения в момент обработки. Весьма актуальной становится задача, связанная с

определением потребных сил зажима обрабатываемой заготовки.

Силы, как известно – векторы, определяемые модулем, направлением и точкой приложения. Заготовка и, стало быть, потребные силы зажима в рамках каждого последующего инструментального перехода, кроме своей величины, изменяют положение (направление) относительно действующих на неё сил резания, что, собственно, и характеризует изменяющиеся условия обработки. В дальнейшем принято, что к изменяющимся условиям обработки не относится изменение сил резания, связанное с состоянием инструмента (износом) и заготовки (твёрдостью). Для каждой позиции заготовки и соответственно – каждого инструмента расчёт потребной силы зажима, а затем и окончательного её выбора представляет собой непростую пространственную задачу. Потому на практике подобные расчёты не осуществляются, хотя входящие в уравнения равновесия силы и моменты сил резания принципиально одинаковы: одни – стремятся сдвинуть зажатую заготовку в направлении какой-либо координатной оси, другие – повернуть её вокруг той или иной оси под действием моментов сил. Сказанное означает, что в рассматриваемом случае

- существует возможность выразить условия равновесия тел системой обобщённых уравнений;
- в дальнейшем с помощью разработанного алгоритма и соответствующей электронной программы появляется возможность определить потребную силу зажима исходной заготовки.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе обработки на станке изменяются размеры, форма заготовки, режимы резания. Если при этом существенно снижается её жёсткость, то в рамках одной и той же операции возникает необходимость целенаправленного управления потребной силой зажима до вполне определённого значения. В этом случае нахождение силы осуществляется, как правило, с дополнительным привлечением тех же цифровых технологий (методов моделирования и численных методов расчёта). Величину этой силы, во-первых, необходимо знать; во-вторых, обеспечить либо ручным путём после остановки станка, либо с помощью встроенной в станок измерительной системы. Так, в многофункциональных программных станках зарубежного производства сейчас применяются приборы, позволяющие, например, беспроводным путём контролировать с помощью встроенного в зажимные элементы приспособлений датчика силу закрепления заготовок.

В связи со сказанным при проектировании приспособлений требует уточнения и совер-

шения методика расчёта потребной силы зажима.

Традиционно проектирование приспособлений для операций механической обработки должно включать в себя разработку схемы базирования и установки, силовой расчёт, состоящий из определения, согласно положениям классической механики, потребных сил зажима и сил, развиваемых механизмом зажима, а также расчёт на точность. В настоящей работе рассмотрена попытка создания обобщённой, формализованной методики нахождения потребной силы зажима применительно к заготовкам, обрабатываемым различными инструментами в различных позициях на многофункциональных обрабатывающих центрах с ЧПУ.

В широко распространённой литературе [1, 2, 3] при проектировании приспособлений достаточно скрупулёзно анализируются деформации, возникающие в контакте заготовки с опорными элементами и оказывающие влияние на погрешность установки, но при этом используется упрощённый подход к расчёту потребной силы зажима, вызывающей эти деформации. Он выражается в рассмотрении такой же упрощённой системы сил, действующих на абсолютно твёрдое тело простой геометрической формы, нахождении искомых реакций, в качестве которых могут быть силы зажима, и выборе наибольшей по величине силы из какого-либо уравнения равновесия. В приведённых примерах системы сил стремятся чаще всего сдвинуть тело в каком-либо направлении и потому представляются некоторыми частными случаями, например, с симметрично расположенной силой резания относительно опор и, естественно, с отсутствием расстояний до точек приложения сил, а, стало быть, с отсутствием моментов сил. Между тем моменты сил, воспринимаемые опорой, возникают даже там, где, казалось бы, их и не должно быть.

В подобных расчётных схемах принимают, что:

- активные силы резания должны быть увеличены в K раз, где K – некий коэффициент запаса, представленный произведением нескольких неоднозначно выбранных сомножителей, зависящих как от изменяющихся, так и от неизменяющихся условий обработки, влияющих на величину силы;

- наложенные на заготовку связи, лишаящие заготовку степеней свободы, должны быть реальными, т.е. обладать трением;

- в лучшем случае к заготовке приложены одна или две активные силы резания, сила зажима, образующие плоскую систему сил; реакции опор на схемах часто не изображают, а под зажимом и на опоре показывают (в той же плоскости) силы трения, препятствующие сдвигу.

О поворотах и моментах сил трения в опоре

заходит речь только тогда, когда заготовка обрабатывается в патроне. В справочнике [2] приведены данные о силе зажима в том же патроне от изгибающего момента, возникающего в вертикальной плоскости под действием главной составляющей силы резания и стремящегося вырвать заготовку из патрона. Эти данные совершенно не учитывают, что в жёсткой заделке в другой (горизонтальной) плоскости также возникает подобный момент от радиальной составляющей силы резания. Кроме того, в такую расчётную схему дополнительно следует добавить моменты других, направленных по оси заготовки сил трения под кулачками, действующих в тех же плоскостях, что и силы резания, и удерживающих заготовку от вырывания. Таким образом, каждая сила резания вносит свой вклад в результирующую силу зажима. Этот же вывод можно сделать на основании закона независимости действия сил, который подкрепляется основными положениями механики. Приведённые рассуждения применимы для любого используемого при обработке приспособления и инструмента, в том числе для многозубой фрезы, которой ниже уделено особое внимание.

В методологии должны рассматриваться общие вопросы, связанные с построением расчётных схем различных силовых процессов обработки и в них не должно быть произвольных субъективных допущений о незначительном влиянии тех или иных сил на результат расчёта. Определение искомой силы зажима в механике производится на основе решения уравнений равновесия сил и моментов сил или с использованием принципа возможных перемещений. Входящие в уравнения силы F_j ($j = 1 \dots k$) и моменты сил могут быть выражены в обобщённом виде, представленном через направляющие косинусы:

$$\sum_{j=1}^k |\vec{F}_j| \cos \alpha_{ij} = 0;$$

$$\sum_{j=1}^k |\vec{F}_j| \cos \alpha_{ij} \cdot h_{ij} = 0,$$

где k – количество действующих на заготовку сил; $i = 1, 2, 3$ – число координатных осей; α_{ij} – угол между вектором силы F_j и осью x_i (или какой-либо другой осью); h_{ij} – алгебраическое плечо проекции силы на плоскость, перпендикулярную к оси x_i (или к какой-либо другой оси).

Для сформулированных выше изменяющихся условий обработки потребную силу зажима необходимо определять из нескольких уравнений, характеризующих различные условия нагружения заготовки в каждом конкретном случае (на каждом инструментальном переходе). Как сказано выше, из найденных значений

выбирается наибольшая сила, обеспечиваемая механизмом зажима. Следует ещё раз подчеркнуть, что это, вопреки мнению большинства публикаций на данную тему [1 - 4], должна быть не одна сама большая сила, а наибольшая результирующая (суммарная) сила зажима, зависящая от всех составляющих силы резания.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Чтобы вписаться в общую методологию определения потребных сил зажима, установить уровень используемых допущений при составлении расчётных схем, необходимо рассмотреть приведённую ниже последовательность и особенности, связанные с проектированием приспособлений, используемых на станках с ЧПУ.

1. Сложную по форме заготовку, обрабатываемую с одного установа, целесообразно представлять в виде 3D-модели с условными обозначениями по ГОСТ 3.1107-81 [5]. В ряде случаев необходимо показывать её в 3D-приспособлении, спроектированном, например, из элементов универсально-сборных приспособлений (УСП). При плоском представлении схемы установки такой и даже более простой заготовки рекомендуется выполнять её в виде двух-трёх проекций на координатные плоскости с изображением количества, мест расположения и размеров опорных поверхностей, воспринимающих силу зажима и являющихся неподвижными связями для заготовки. Или это расположенные определённым образом выступающие опоры в виде шайб или штырей, или пластины, реализующие направляющую или установочную базу. Опорами для цилиндрических поверхностей заготовок могут быть определённой длины кулачки патрона, оправка, поверхности призмы, плоские или со штырями, реализующие двойную опорную или двойную направляющую базу.

2. Указать на 3D-модели координатные оси в системе координат заготовки (детали) X_d, Y_d, Z_d в соответствии с её положением на станке с ЧПУ. Начало координат лучше размещать в нулевой точке заготовки (детали), обозначаемой буквой W .

3. Изобразить действующие на заготовку активные силы – силы резания. С целью создания единого подхода к решению задачи по определению потребной силы зажима в любой операции и на любом инструментальном переходе технологического процесса для большинства режущих инструментов необходима систематизация сил резания, упорядочение их обозначений и представление в формализованном виде.

При обработке, сопровождаемой вращением заготовки или инструмента, силу резания, как угодно расположенную в пространстве, принимают составленной из трёх проекций на коор-

динатные оси P_x , P_y и P_z . Обозначения координатных осей на оборудовании с ЧПУ не являются произвольными. Независимо от типа оборудования индексы сил обозначаются соответственно координатным осям с правой координатной системой, принятой во всех станках с ЧПУ. Так как ось шпинделя таких станков определяет ось z , то осевую силу целесообразно обозначить P_z и соответственно – проектировать её на ось z , а силы, расположенные в плоскости, перпендикулярной оси z , в виде P_x и P_y . Прежние широко распространённые в отечественной литературе обозначения сил в таком случае не являются проекциями на эти оси координат, поэтому их проще представлять в виде $P_{окр}$, $P_{рад}$ и $P_{ос}$.

Точки приложения сил обычно без труда назначаются и изображаются при обтачивании и растачивании резцами, обработке отверстий осевыми инструментами. Но при использовании многолезвийного инструмента – фрезы – к определению места приложения сил относятся с некоторыми допущениями, уровень которых в значительной степени не определён. Ясно, что силы резания следует помещать в зоне контакта, где количество участвующих в обработке зубьев становится постоянным, а процесс – установившимся. Силы резания обычно прикладывают к месту входа фрезы в контакт с заготовкой или изображают в средней части достаточно протяжённой дуги контакта [2], полагая, что в этом месте стружка имеет некоторую среднюю толщину. В ряде случаев [1] изображают силы, вообще не имеющие определённой точки приложения, а указывающие лишь направление их действия. При этом значение главной составляющей силы резания определяют по известной эмпирической формуле, в которой используется максимальная толщина срезаемого слоя, равная подаче на зуб S_z , и общее число зубьев z фрезы, никоим образом не соответствующее глубине резания. В рекомендациях зарубежных фирм-изготовителей инструментов [6] предлагается определять силу и мощность по средней толщине стружки и удельной силе резания для различных групп материалов. По предложенной ими методике появляется возможность оценить действие на заготовку сил, создаваемых каждым зубом (рис. 1). Но для этого сначала необходимо установить, сколько зубьев находится в постоянном контакте, а затем найти толщину и площадь срезаемого каждым зубом слоя.

При $a_p < D_{фр}/2$ зона контакта фрезы с обрабатываемой поверхностью ограничивается центральным углом

$$\alpha = \arccos \frac{OO_1}{OA} = \arccos \left(1 - 2 \frac{a_p}{D_{фр}} \right),$$

где a_p – глубина резания (в отечественной литературе – t); $D_{фр}$ – диаметр фрезы; при $a_p > D_{фр}/2$ – углом

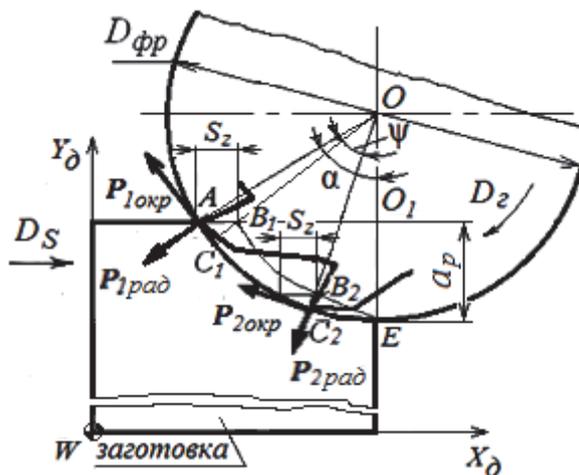


Рис. 1. Схема сил, действующих на заготовку при фрезеровании

$$\alpha = 90^\circ + \arcsin \left(2 \frac{a_p}{D_{фр}} - 1 \right).$$

От этого угла, определяющего максимальную толщину стружки, откладываются значения углов между зубьями $\psi = 360^\circ/z$. На рис. 1 показан общий случай, когда углы α и ψ не кратны между собой, а в контакте находятся два зуба. Со стороны каждого из них на заготовку действует переменная сила резания, вызванная (например, при постоянной ширине b) толщиной $B_1C_1 = a_1 = a_{max}$ и $B_2C_2 = a_2$ снимаемого слоя. При малой величине подачи на зуб S_z по сравнению с геометрическими размерами фрезы можно считать, что лучи OA и OC_1 практически сливаются в один, а расположенный на выходе из контакта треугольник AC_1B_1 является прямоугольным. Здесь толщина $a_1 = a_{max} = S_z \cdot \sin \alpha$; по аналогии – $a_2 = S_z \cdot \sin(\alpha - \psi)$. Если бы в контактной зоне находились три зуба, то $a_3 = S_z \cdot \sin(\alpha - 2\psi)$ и т.д.

Таким образом вычисляются силы резания $P_{1окр} = a_1 b \cdot k_c$, $P_{2окр} = a_2 b \cdot k_c$, где b – ширина фрезерования; k_c – удельная сила резания [6], Н/мм², а затем – радиальная и осевая силы, связанные с ней соответствующими соотношениями.

Найденные силы можно привести к какому-либо центру, например, к точке E (месту входа в контакт) с известными координатами X_E и Y_E (рис. 2). В новой эквивалентной системе силы приводятся к главным векторам $\vec{R}_{окр} = \vec{P}_{1окр} + \vec{P}_{2окр}$, $\vec{R}_{рад} = \vec{P}_{1рад} + \vec{P}_{2рад}$, а также к главным моментам сил $\vec{M}_{окр} = \vec{M}_{1окр} + \vec{M}_{2окр}$, $\vec{M}_{рад} = \vec{M}_{1рад} + \vec{M}_{2рад}$ относительно оси Z_d , которые при фрезеровании обычно не учитываются. В конечном итоге силы $R_{окр}$ и $R_{рад}$ выражаются проекциями $R_x = -R_{окр x} - R_{рад x}$ и $R_y = R_{окр y} - R_{рад y}$ на координатные оси X_d и Y_d . Аналогичным образом можно построить эк-

вивалентную систему из параллельных между собой осевых сил P_{1oc} и P_{2oc} , расположенных с центром E в разных плоскостях и приводимых к главному вектору $\vec{R}_{oc} = \vec{R}_{oc1} + \vec{R}_{oc2}$ ($|\vec{R}_{oc}| = R_z$) и главному моменту $\vec{M}_{oc} = \vec{M}_{oc1} + \vec{M}_{oc2}$, имеющему проекции M_{ocx} и M_{ocy} на координатные оси X_d и Y_d , выраженные парами сил.

Приведённые силы, как и приведённые моменты, будут содержать коэффициенты, зависящие от диаметра фрезы, глубины и ширины срезаемых слоёв, углов α и ψ и в какой-то степени компенсировать назначаемый впоследствии коэффициент запаса K .

Рассмотренный анализ сил, возникающих при фрезеровании, показывает, что с формализованной точки зрения действие любого режущего инструмента на заготовку можно выразить силами и моментами сил. Таким образом, независимо от применяемого инструмента в обобщённые уравнения равновесия следует вводить проекции сил и моментов сил резания.

4. Изобразить расчётную схему, включающую активные силы, силу зажима, реакции связей (опор), силы трения на опорах, в том числе под зажимными элементами, моменты сил в жёсткой заделке, создаваемой силой зажима. В расчётную схему при необходимости могут быть также включены силы инерции и силы тяжести крупных заготовок. Следует иметь в виду, что реакции возникают только в опорах [1], воспри-

нимающих силу зажима. Те опоры, которые после закрепления заготовки перестают выполнять свои первоначальные функции, связанные с базированием, могут быть отброшены. Реакций в таких опорах, например, в опоре, реализующей установочную базу для заготовки, изображённой на рис. 2 и находящейся в плоскости $X_d Z_d$, при закреплении абсолютно твёрдого тела не возникает и потому их не следует учитывать в расчётных схемах. Реакция опоры выражается нормальной N и касательной составляющей – силой трения $F_{тр}$ и имеет место лишь в неподвижной губке тисков, создающей направляющую базу, на которую направлена сила зажима P_3 .

Эта опора вместе с рабочей поверхностью подвижной (зажимной) губки, воспринимает также действие:

- сил R_x и R_y , стремящихся сдвинуть заготовку в направлении осей X_d и Y_d , и противодействующих им сил трения $F_{тpx}^{(N)}$, $F_{тpy}^{(N)}$, $F_{тpx}^{(P_3)}$ и $F_{тpy}^{(P_3)}$;

- изгибающего момента от сил $R_z = R_{oc}$ и R_y , а также вызванного ими реактивного момента от распределённых по треугольному закону сил Q и сил трения $F_{тp}^{(Q)}$, образующих пары сил с соответствующими моментами $Q \cdot \frac{1}{3}b$ и $F_{тp}^{(Q)} \cdot B$;

- главных моментов $M_{окр}$ и $M_{рад}$ и противо-

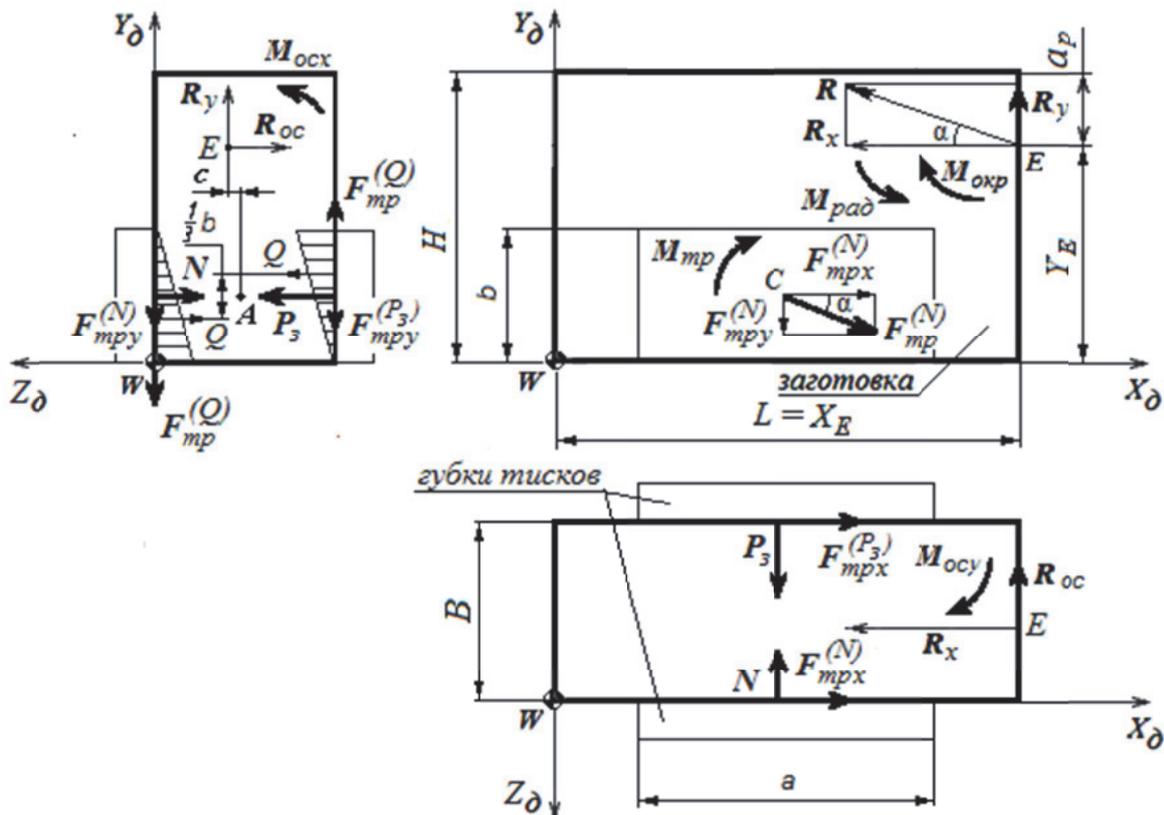


Рис. 2. Расчётная схема сил, действующих при фрезеровании на зажатую в тисках заготовку: H, B и L – размеры заготовки; a и b – размеры губок

действующего им крутящего момента сил трения $M_{\text{тр}z}$.

Активные силы R_x и R_y имеют равнодействующую $R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$, направленную под

углом $\alpha = \arctg R_y / R_x$ к оси x . Под этим же углом в обратную сторону направлены силы трения

$$F_{\text{мп}}^{(P_3)} = \sqrt{[F_{\text{мп}x}^{(P_3)}]^2 + [F_{\text{мп}y}^{(P_3)}]^2} = \sqrt{(fP_3 \cos \alpha)^2 + (fP_3 \sin \alpha)^2} = fP_3$$

и соответственно – сила $F_{\text{мп}}^{(N)} = fN$.

Таким образом, расчётная схема, изображённая на рис. 2, существенным образом отличается от весьма упрощённых схем, рассматриваемых в учебной и технической литературе. Составленные для неё уравнения равновесия пространственной системы сил для общего случая, когда $P_3 \neq N$, имеют вид:

$$\sum F_{kx} = 0; \quad -R_x + fP_3 \cos \alpha + fN \cos \alpha = 0; \quad (1)$$

$$\sum F_{ky} = 0; \quad R_y - fP_3 \sin \alpha - fN \sin \alpha = 0; \quad (2)$$

$$\sum F_{kz} = 0; \quad R_{oc} - P_3 + N = 0; \quad (3)$$

$$\sum M_{Ax} = 0; \quad M_{ocx} - R_y \cdot c - R_{oc} (H - a_p) + Q \frac{1}{3} b + fQB - fP_3 \frac{B}{2} + f(P_3 - R_{oc}) \frac{B}{2} = 0; \quad (4)$$

$$\sum M_{Cz} = 0; \quad R_x \left(H - a_p - \frac{b}{2} \right) + R_y \frac{L}{2} + M_{\text{рад}} - M_{\text{окр}} - 2M_{\text{мп}} = 0. \quad (5)$$

Уравнения (1) и (2) тождественны друг другу. Решение начинается с уравнения (3), которое можно рассматривать как уравнение связи и в котором $N = P_3 - R_{oc}$. Это значение, подставленное в уравнения (1) и (2), приводит к равенствам $fP_3 \cos \alpha = \frac{1}{2}(R_x + fR_{oc} \cos \alpha)$ и

$$fP_3 \sin \alpha = \frac{1}{2}(R_y + fR_{oc} \sin \alpha),$$

выражающим условия отсутствия сдвига в плоскости $X_d Y_d$, откуда потребная сила зажима:

$$P_3 = \frac{1}{2f} \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + 2fR_{oc}(R_x \cos \alpha \pm R_y \sin \alpha) + f^2 R_{oc}^2}. \quad (6)$$

В последней формуле знак минус соответствует случаю, когда сила P_3 направлена в одну сторону с силой R_{oc} . Другой случай имеет место при $R_{oc} = 0$:

$$N = P_3 = \frac{1}{2f} \sqrt{R_x^2 + R_y^2}.$$

Уравнение (4) составлено из моментов сил относительно оси x , проходящей через центр неподвижной заделки (через точку А). Его решение позволяет найти ещё одну составляющую реакции опоры

$$Q = \frac{R_y c + R_{oc} \left(H - a_p - f \frac{B}{2} \right) - M_{ocx}}{\frac{1}{3} b + fB}. \quad (7)$$

Уравнение (5) выражает условие отсутствия поворота заготовки в плоскости $X_d Y_d$. Удерживающие заготовку от поворота два момента трения покоя $M_{\text{тр}}$ возникают на плоскостях губок от нормального усилия зажима и реакции, равномерно распределённых по площадкам $S = a \cdot b$ с интенсивностью p .

С целью определения положения точки, относительно которой может произойти поворот заготовки при минимальном по величине моменте и соответственно – минимальной силе трения, рассмотрим схему действующих сил в системе координат xSy (рис. 3). Выберем в плоскости заготовки любую точку $N(x_0, y_0)$ и найдем результирующий момент, который компенсирует поворот заготовки относительно этой точки. Если рассмотреть в произвольной (текущей) точке $M(x, y)$ некоторый плоский элемент площадью $ds = dx \cdot dy$, то на него будет действовать сила трения $F_{\text{тр}}$ величиной $dF_{\text{мп}} = pf dx dy$, направленная перпендикулярно вектору NM . Элементарный момент данной силы относительно точки $N(x_0, y_0)$ будет равен

$$dM = pf \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} dx dy$$

или

$$dM_{\text{мп}} = \frac{dM}{pf} = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} dx dy.$$

Полный момент, который нужно приложить к зажатой в тисках заготовке, чтобы повернуть ее относительно точки $N(x_0, y_0)$, является функцией двух переменных x_0 и y_0 и численно равен

$$M_{\text{мп}} = \iint_D \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} dx dy = \int_{-b/2}^{b/2} dy \int_{-a/2}^{a/2} \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} dx. \quad (8)$$

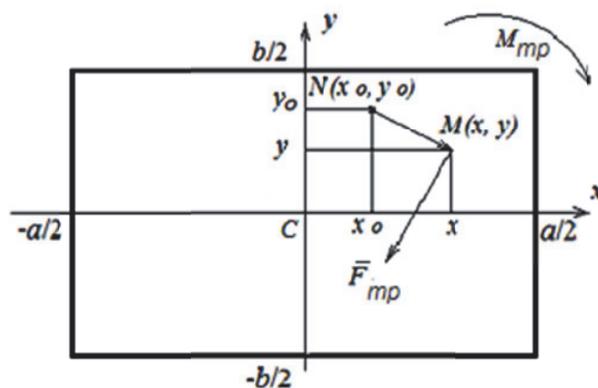


Рис. 3. Схема к определению момента сил трения

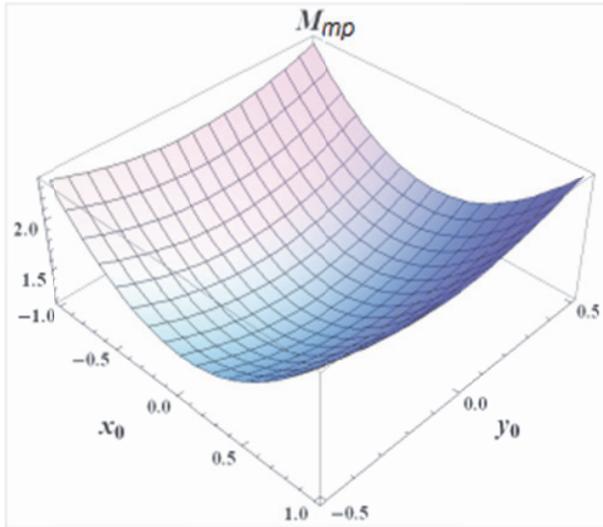


Рис. 4. Графическое представление момента трения на рабочей поверхности зажимного элемента приспособления

Сначала, интегрируя по частям равенство (8), определилась первообразная внутреннего интеграла, затем после подстановки пределов интегрирования (с использованием пакета *Mathematica*) в окончательном виде получилось достаточно сложное выражение, графическая интерпретация которого представлена на рис. 4, а некоторые сечения поверхности – на рис. 5.

В точке $M_0(x_0, y_0)$ отмечается минимальный момент трения $M_{тр} = 1,1864$. Это означает, что заготовку легче всего повернуть вокруг её геометрического центра тяжести S , связанного с формой той поверхности, к которой приложена сила зажима.

Сила зажима должна быть по своей величине необходимой и достаточной для обеспечения неподвижности обрабатываемой заготовки. Исходя из этого соображения, далее принято, что момент $M_{тр}$ относительно центра S , определённый из уравнения (5), создаётся парой сил трения, каждая из которых равна $M_{мп}/h_{cp}$, где $h_{cp} = (a+b)/2$ – средний размер прямоугольной пло-

щадки (плечо пары сил). Соответственно сила зажима, обеспечивающая этот момент трения:

$$P_3^{(M)} = \frac{2M_{мп}}{f(a+b)}. \quad (9)$$

Результирующая сила зажима заготовки в тисках определяется суммой сил, представленных выражениями (6), (7) и (9).

Аналогичные рассуждения и выводы можно привести, рассматривая равновесие заготовки, закреплённой в трехкулачковом патроне. В качестве примера на рис. 6 показана в проекциях на координатные плоскости расчётная схема зажима втулки в 3-х кулачковом патроне при сверлении отверстия на многофункциональном токарном станке с ЧПУ. Наибольшая расчётная потребная сила зажима соответствует вполне определённому угловому положению кулачков, а именно – один из них должен находиться на той оси X_d или Y_d , по которой инструмент подводится к обрабатываемой поверхности.

На фронтальном виде изображены реакции (силы зажима), возникшие в опорах от действия изгибающего момента $M_{и}$, создаваемого осевой силой P сверла на плече L . Эти реакции, обозначенные, как и на рис. 2, символом Q , представлены распределённой по треугольному закону на длине l нагрузкой с парами сил (Q_1, Q_{23}) и $(F_{трz}, F_{трz})$ и определяются из уравнений моментов сил относительно оси X_d . При этом сначала реакции Q_2 и Q_3 были приведены к точке E , а затем заменены [7] эквивалентной силой Q_{23} , по модулю равной Q_1 и направленной с нею по одной прямой в разные стороны. Суммарная сила зажима от совместного действия силы P и момента $M_{и}$ не только для наиболее нагруженного, но и для всех кулачков

$$P_3 = P + Q_{23} = P \left(1 + \frac{3L}{l + 3fD} \right). \quad (10)$$

Но кулачки патрона при сверлении воспринимают нагрузку и от крутящего момента $M_{кр}$, а соответственно заготовка – от реактивных моментов в опоре. Аналогичное действие на заго-

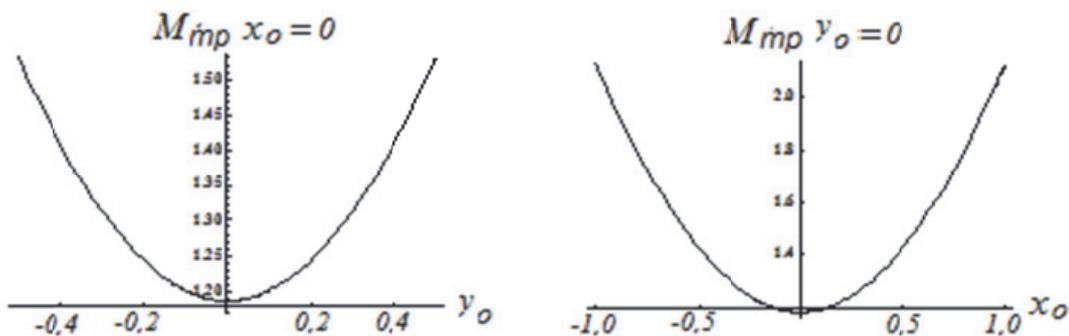


Рис. 5. Сечения поверхности момента трения: слева - плоскостью $x_0 = \text{const}$; справа – плоскостью $y_0 = \text{const}$

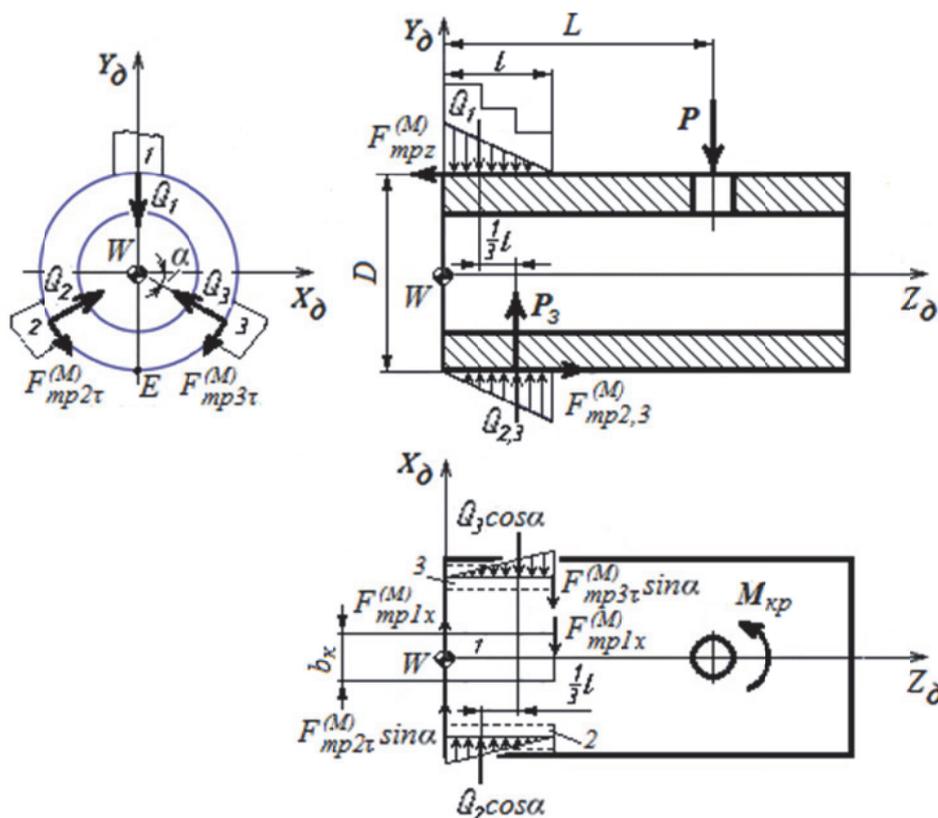


Рис. 6. Расчётная схема сил, действующих при сверлении отверстия на зажатую в тисках заготовку;

l и b_k – длина и ширина кулачков 1, 2 и 3

товку оказывают при обработке резцом моменты сил $P_{рад}$ и $P_{ос}$. Расчётная схема для данного случая является симметричной ($Q_2 = Q_3$, $F_{тр2} = F_{тр3}$) и приведена на горизонтальной проекции. При плоской поверхности кулачков ситуация полностью аналогична закреплению в призме с углом 120° , в которой заготовка стремится повернуться вокруг оси Y_d со сдвигом вверх по этой оси (см. профильную проекцию на рис. 6). Повороту препятствуют моменты проекций сил Q_2 и Q_3 , сил трения $F_{mp2\tau}$ и $F_{mp3\tau}$ на ось X_d и момент пары сил трения F_{mp1x} с плечом l .

Совместное решение уравнений

$$\begin{aligned} \sum M_{Y_w} = 0; \quad M_{кр} - Q_3 \cos \alpha \cdot \frac{1}{3}l - fQ_3 \sin \alpha \cdot l - fQ_1 \cdot l = 0; \\ \sum F_{ky} = 0; \quad 2Q_3 \sin \alpha - 2fQ_3 \cos \alpha - Q_1 = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

позволяет найти дополнительную силу зажима Q_3 , обеспечивающую отсутствие поворота заготовки относительно оси Y_d .

Таким образом, необходимая сила зажима для рассматриваемого случая представляется так же, как и в предыдущем случае, суммой силы P_3 , определённой по формуле (10), и силы Q_3 , полученной при решении системы уравнений (11).

Если при обработке на заготовку действует ещё и окружная (главная) сила резания $P_{окр}$, то возникает необходимость учёта ещё нескольких дополнительных сил зажима. Эти силы препят-

ствуют сдвигу заготовки в направлении оси Y_d , на которой должен быть расположен один из кулачков, и повороту её вокруг осей X_d и Z_d , создавая при этом соответственные реакции в опорах (или иначе – силы зажима). В отечественной практике необходимую силу зажима рассчитывают, как правило, лишь по крутящему моменту относительно оси Z_d .

ВЫВОДЫ

Детальное рассмотрение всех сил, действующих на зажатую в приспособлении и обрабатываемую даже простую по форме заготовку, приводит к довольно сложным, пространственным и трудно читаемым расчётным схемам.

В подобных случаях, с методической точки зрения, целесообразно, используя закон независимости действия сил или принцип суперпозиции, составлять для заготовки, неподвижно закреплённой в опоре, более простые схемы и соответственные им уравнения равновесия, из которых затем определять отдельные составляющие необходимой силы зажима. Полная необходимая сила зажима является суммарным вектором системы нескольких параллельных сил, действующих в опоре заготовки и отражающих различные условия её силового нагружения.

Независимо от применяемого при обработке инструмента его воздействие на заготовку представляется проекциями сил и моментов сил резания на оси с правой декартовой системой координат, принятой в станках с ЧПУ. Соответственно в опоре (опорах) возникают не только реакции, но и моменты в виде пар сил, противодействующие повороту заготовки относительно этих осей и в большинстве случаев не учитываемые в расчётах.

Предложенные дополнения к методике расчёта потребной силы зажима вызывают необходимость учёта в рамках АСТПП размеров зажимных элементов приспособлений, применяемых на конкретном производстве.

С целью единообразного формализованного подхода к решению задачи систему уравнений целесообразно представлять в обобщенном виде, выражая проекции сил и моментов сил на координатные оси через направляющие косинусы углов, которые в каждом конкретном случае могут быть разными как при автоматической смене инструментов на станке, так и при смене позиций заготовки относительно режущих инструментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корсаков В.С. Основы конструирования приспособлений: Учебник. М.: Машиностроение, 1983. 277 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя: В 2-т. Т. 2 [под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова]. М.: Машиностроение-1, 2003. 944 с.
3. Станочные приспособления: Справочник. В 2-х т. Т.1 [под ред. Б.Н. Вардашкина, А.А. Шатилова]. М.: Машиностроение, 1984. – 592 с.
4. Кузнецов Ю.И. Основы инженерного проектирования оснастки для гибких производственных систем: Конструирование и расчёт. Учебное пособие. М.: ВНИИТЭМР, 1986. 71 с.
5. ГОСТ 3.1107-81. ЕСТД. Опоры, зажимы и установочные устройства. Графические изображения. М.: Издательство стандартов, 1982. 9 с.
6. Вращающиеся инструменты: Фрезерование, сверление, глубокое сверление, растачивание: Каталог. М.: ОАО «Сандвик МКТС», 2015.
7. Кургузов Ю.И., Колбасов М.О. Особенности расчёта силы зажима заготовок в самоцентрирующих патронах с учётом изгибающих нагрузок // Высокие технологии в машиностроении: материалы Всерос. науч.-техн. интернет-конф. Самара: Самар. гос. тех. ун-т, 2014. С. 49 – 51.

IMPROVEMENT METHODS OF CALCULATING THE REQUIRED CLAMPING FORCE PREPARATIONS IN CHANGING PROCESSING CONDITIONS

© 2018 Y.I. Kurguzov

Samara State Technical University

Changing conditions characteristic of modern multifunctional machines when processing within a single technological operation with one complete machining of workpiece in the adaptation makes various tools within its positions. During the processing of the workpiece undergoing significant changes its geometry, its stiffness is also changed. The resulting elastic deformations, resulting in reduced accuracy of machined surfaces. With a view to obtaining the required precision in the manufacture of parts you must manage the power clamp. But you first must be defined the necessary power, which then enforces the clamping mechanism. The model for CNC axes proposed system right generalized kind of equations of equilibrium existing in space on absolutely solid billet of active forces and moments of forces, in which direction their actions expressed variables cosines guides, and the response required clamping force is the fulcrum. Unlike the currently existing views to take into account the fact that according to the law, the independence of the forces of each one of them contributes to the value of the desired clamping force. Clamping force is the resultant force, drawn from both the full reaction supports, and pairs of forces arising from actions on the support points of the force. For example, milling and turning blanks, fixed accordingly in machine vise and three-jaw chuck, shows the proverbial, but not used in full when calculating devices technique associated with the features of the existing definition in the preset cutting forces, friction clamp and place their applications. While it has been shown that in some cases it is advisable to simplify the decision on processed workpiece system forces replace an equivalent system. In the analytical scheme and the equilibrium equations are introduced not only the distance from the place of the active forces to the places of fastening of the workpiece, but (depending on conditions) dimensions, related either to the clamping elements or to dockable surfaces of blanks. The relationships between these dimensions are defined in cutting force coefficients are part of (one of the factors that depends on imperfections calculation schemas) subjectively assigned and changing in a wide range of safety factor.

Keywords: equilibrium equations, cosines so many times guides, clamping force control, equivalent system forces, hard sealing, spatial calculation scheme forces, frictional moment on flat anvil, reactive moments of forces, the total clamping force.