

РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ РОБОТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ОПЕРАЦИЙ СВЕРЛЕНИЯ

Е.И. Щурова

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Применение манипуляционных роботов для механообработки, например, для операций сверления все еще носит ограниченный характер. Это обусловлено относительно низкой жесткостью таких роботов. Низкая жесткость является причиной низкой точности получаемых поверхностей деталей, в том числе и точности расположения осей отверстий. В связи с этим расчетное прогнозирование технологами возможной величины увода сверл с использованием роботов является актуальной задачей машиностроения. Наиболее точным методом расчета жесткости сборных конструкций является метод конечных элементов. Однако расчет конечно-элементных сеток роботов на основе их САД-моделей обуславливает формирование таких сеток с несколькими миллионами элементов. Компьютеры, доступные сегодня технологам, не позволяют выполнить такие громоздкие расчеты. Следовательно, возникает задача выполнения подобных расчетов с адекватными сетками меньших размеров. В работе предлагается метод расчета сеток, основанный на воксельном моделировании, а именно на получении облака узловых точек вокселей с использованием САД-моделей роботов. Используя четыре допущения, в числе которых: замена сборки робота эквивалентной деталью; использование полученных на основе экспериментов эквивалентных по жесткости шарниров; неизменность положения звеньев робота в процессе сверления и допущение по силовым нагрузкам на роботе, – получили воксельную модель робота и на этой основе рассчитали регулярные конечно-элементные сетки численностью до одного миллиона элементов. Была выполнена верификация данного способа расчета на примере смещений конца последнего звена трехосевого робота. Отклонения расчетных и экспериментальных данных не превысили 18 %. Учитывая множество мало формализованных факторов расчета, например, сил резания, такое отклонение приемлемо для целей прогнозирования точности расположения отверстий в процессе их сверления роботами. Следовательно, предлагаемый метод расчета является перспективным для технологической подготовки производства.

Ключевые слова: манипуляционный робот, сверление отверстий, жесткость робота, метод конечных элементов, воксельное моделирование.

Введение. В последние десятилетия промышленные роботы все шире применяются в производстве [1, 2]. В частности, в период с 2000 по 2010 годы, например, в азиатском регионе количество ежегодно используемых во всех отраслях роботов выросло с 92 до 180 тысяч. Однако при этом их доля во всех производственных процессах составляла не более 10 %. Одним из наиболее результативных применений роботов является их использование для сварочных операций. Количество роботов, применяемых в операциях резания, составляет всего 5...7 % от количества сварочных роботов [1]. По данным Международной федерации робототехники в 2019 году для операций перемещения деталей и сборочных операций установлено 1855 роботов, для операций сварки – 640 роботов, а для механообработки – всего 44 робота [2]. При этом, если общее количество промышленных роботов, используемых ежегодно, с 2010 по 2020 годы выросло в 2,7 раза, то количество роботов, применяемых для процессов механообработки, практически не увеличилось [1, 2]. Одним из перспективных применений металлообрабатывающих роботов считается их использование для обработки крупногабаритных деталей авиационной и ракетно-космической техники. В корпусных деталях для этих отраслей выполняется множество отверстий [3]. Тем не менее, и такое применение роботов остается все еще достаточно ограниченным. Ограниченные показатели применимости роботов для механообработки связаны с некоторыми их характерными

недостатками. Одним из таких недостатков является сравнительно низкая точность перемещений роботов под нагрузкой, вызванная относительно низкой жесткостью их звеньев и шарниров. Факт трудностей, обусловленных жесткостью, косвенно подтверждается диаграммой предельных нагрузок во взаимосвязи с длиной вылета рабочего органа. Так, например, для робота компании KUKA «KR 210 R2700» производителями в технической документации приводится диаграмма, в соответствии с которой на длине 350 мм можно приложить нагрузку, равную 2100 Н, а на длине 1100 мм нагрузка должна составлять всего лишь 900 Н [4].

Таким образом, вопросы прогнозирования деформаций звеньев роботов от сил резания, возникающих, например, при сверлении, и связанный с этим прогноз точности обработки роботами, в частности точности расположения осей отверстий, являются актуальной производственной задачей. Необходимо отметить, что жесткость роботов изменяется не только в зависимости от положения их звеньев в текущий момент времени обработки, но и от состояния их шарниров в процессе эксплуатации. Поэтому прогнозирование технологом точности обработки, например, на операции сверления, должно быть выполнено на основе расчета податливости конкретного робота не только с учетом текущего положения его звеньев и паспортных характеристик его шарниров, но и с учетом степени изменения их жесткости со временем. Такое прогнозирование должно выполняться в технологической службе подготовки производства на типовых компьютерах технологов, которые, как правило, имеют не самую высокую производительность по сравнению с передовыми компьютерами, доступными инженерам на современном рынке компьютерных технологий.

Исходя из этого, авторами был выполнен анализ публикаций по расчетам статической жесткости промышленных роботов и выявлены имеющиеся технические или научные проблемы. Прежде всего следует отметить, что все найденные нами публикации со статическими расчетами роботов [5–22] можно условно разделить на три основные группы: расчеты отдельных звеньев роботов [10, 15–19]; расчет роботов с упрощенными САД-моделями [5–8, 14] и расчет роботов с полноценными моделями, которые используются для изготовления роботов [9, 11–13, 20].

Публикации первой группы, связанной с расчетом отдельных звеньев методом конечных элементов (МКЭ), направлены на совершенствование конструкции таких звеньев и связаны с деятельностью разработчиков самих роботов. Здесь следует отметить размеры конечно-элементных сеток, которые были представлены в статьях. В первой из указанных публикаций одна деталь одного из звеньев робота была представлена 52 447 узлами [10]. В другой работе аналогичная упрощенная деталь описывалась 24 411 узлами [15]. Таким же образом в других публикациях: 100 181 узел [16] и 8 095 узлов для описания деталей [17]. В остальных публикациях количество узлов не приводится. Если учесть, что таких деталей в каждом звене робота несколько, а количество звеньев промышленных роботов 6...8, то оценочный расчет показывает, что общее число узлов конечно-элементной сетки роботов превысит миллион. Выполнение жесткостных расчетов таких роботов технологами промышленных предприятий на доступной им компьютерной технике сегодня не представляется возможным. Таким образом, типовой подход, связанный с использованием САД-моделей разработчиков роботов при построениях, например, конечно-элементных сеток для целей технологической подготовки производства сегодня не представляется возможным. Кроме того, указанные САД-модели разработчиков являются коммерческой тайной предприятий по производству роботов и не могут быть опубликованы для всеобщего доступа. Следовательно, данное направление работ по расчету жесткости роботов технологами по полным САД-моделям представляется сомнительным.

Публикации второй группы, связанной с расчетами жесткости роботов упрощенной конструкции направлены на иллюстрации некоторых методик МКЭ, применяемых разработчиками роботов. Например, в работе С. Рупаза, посвященной одной из таких методик, в выводах отмечается: «Это не доказывает, что конструктивные элементы промышленного робота должны быть сконструированы таким образом, но это показывает, что на самом деле существуют эффективные инструменты проектирования, которые помогают проектировщику на всех этапах проектирования» [6]. В другой подобной работе авторы отмечают, что большие сетки не позволяют выполнить нужные расчеты, а уменьшение размеров сеток за счет увеличения размеров конечных элементов не дает адекватных результатов [19]. Таким образом, сами авторы подтверждают, что, во-первых, данные расчеты не вполне адекватны и, во-вторых, не направлены на расчеты жесткости роботов целиком. Следова-

тельно, рассматриваемые выше исследования также не позволяют решить задачу технологов по расчету жесткости роботов и прогнозирование точности обработки.

Публикации третьей группы, связанные с расчетами роботов МКЭ по полноценным моделям, являются сравнительно редкими примерами. Это снова связано с трудностями вычислительного порядка. В частности, элементарный робот собственной конструкции, представленный в одной из опубликованных работ, описывается 1 613 135 узлами [9]. В другой публикации робот описан 2 054 524 узлами [12]. В работе с четырехзвенным роботом собственной конструкции было использовано 1 056 426 узлов [13]. В остальных статьях сведения по количеству узлов не приводятся. Такие сведения по количеству узлов в конечно-элементных моделях реальных роботов приводятся в данном месте с одной целью, – показать, что расчет МКЭ жесткости реального промышленного робота сегодня является нетривиальной задачей. Современные компьютеры, доступные в проектных подразделениях, не могут быть использованы для подобных расчетов с несколькими миллионами узлов МКЭ. Здесь же отметим, что все эти публикации были выполнены в период 2017–2020 годов. Публикаций более раннего периода с результатами расчетов общей жесткости изготавливаемых серийно промышленных роботов найти не удалось. Все это позволяет сделать вывод о том, что существующие сегодня типовые подходы применения конечно-элементных моделей для расчета жесткости серийных промышленных роботов не позволяют решить задачу технологической подготовки производства, связанную с прогнозированием точности сверления.

Анализ вышеприведенных публикаций позволил выявить еще ряд особенностей. Как правило, авторы данных исследований считают жесткость робота не как у сборки подвижных деталей, а как у одной большой детали, в то время как в сборке из множества взаимно перемещающихся деталей всегда имеются зазоры. Положение данных зазоров в соединении двух таких деталей зависит от направления прилагаемой нагрузки. Вместе с тем в конструкциях современного технологического оборудования величины таких зазоров минимизируются, все чаще применяются безззорные редукторы и винтовые пары с преднатягом [21]. Как уже отмечалось выше, другой особенностью является то обстоятельство, что общая жесткость промышленного робота существенно зависит от текущего положения его звеньев. Таким образом, необходимо не просто разработать математическую и связанную с ней конечно-элементную модель робота, а получать наборы таких моделей в нужном положении робота под конкретные переходы данной технологической операции.

Все это обуславливает необходимость разработки нового подхода в получении математических и связанных с ними конечно-элементных моделей роботов, причем данные модели должны быть с размерами сеток, приемлемыми для компьютеров технологических отделов. По-видимому, на современном этапе развития компьютерной техники приемлемой можно признать модель с числом узлов до одного миллиона. Данная техническая проблема обуславливает поиск научного решения – математического моделирования промышленных манипуляционных роботов на основе их конструкторских разработок, опубликованных производителями серийных роботов в известном ограниченном по информационной наполненности формате. Такое решение представляется достаточно сложной задачей для всех случаев механообработки вообще, поскольку, например, фрезерование характеризуется большой динамичностью самого процесса резания, и вибрации технологической системы могут стать в этом случае преобладающим вопросом исследования. Однако, например, на операции сверления, когда вращающийся инструмент совершает всего лишь одно осевое движение, вектор силы резания как результирующей всех сил на сверле практически не меняет своего положения в пространстве и не имеет большой амплитуды колебаний по величине. Перемещение звеньев робота относительно мало по сравнению с их размерами и размерами всего робота. В качестве допущения можно принять, что такое малое перемещение последнего звена робота при обработке отверстия не изменяет положений звеньев робота в пространстве. Следовательно, задачу расчета жесткости робота для операции сверления условно можно считать квазистатической для заданного неизменного положения его звеньев.

Данный анализ позволил сформулировать следующую **цель** данной работы: повышение точности обработки отверстий сверлением с использованием манипуляционных роботов путем прогнозирования отклонений положения осей этих отверстий на основе численного расчета деформаций элементов технологической системы от заданных на инструментах сил резания.

Ранее авторы публикации предложили методику расчета жесткости манипуляционных роботов на основе конечно-элементных расчетов с получением необходимых сеток конечных элементов из воксельных моделей этих роботов. Расчеты выполнялись в предположении, что данные роботы представляют собой одну монолитную деталь и имеют дискретно перемещающиеся шарнирные элементы [22]. Данные расчеты показали принципиальную возможность расчета жесткости роботов с приемлемыми по размерам сетками конечных элементов – сетками до одного миллиона элементов, однако экспериментально эти расчеты не были верифицированы. Для окончательного принятия решения принципиальной применимости таких расчетов в технологической подготовке производства такая верификация необходима. В данной работе решается именно такая задача: приводятся расчеты по указанной методике и дается их верификация экспериментальными данными. Полученные результаты с сетками до одного миллиона конечных элементов показали, что прямое применение такой методики оказывается неприемлемым, расчетные и экспериментальные данные могут различаться в несколько раз.

На примере одного из роботов было установлено, что наибольшее влияние на такое расхождение оказывают шарниры и другие элементы подвижных соединений. Для расчетов предложено использовать отдельные экспериментально верифицированные модели шарниров и других подвижных соединений. Полученные при такой модификации решения достаточно точно сходятся с экспериментальными данными для рассматриваемого робота. Таким образом, была принципиально решена поставленная в данной работе задача по расчету зависимости технологами предприятий жесткости роботов от сил резания на режущих инструментах для последующего прогнозирования на основе этого точности обработки. Результаты исследований нашли свое отражение в следующих разделах: в текущем дан обзор и анализ состояния вопроса в области расчета жесткости манипуляционных роботов; в первом разделе приведены расчетные схемы и допущения, во втором – результаты расчетов перемещения последнего звена робота и коррекция модели на основании экспериментальных данных. Далее приведены результаты скорректированных расчетов перемещения этих звеньев робота и их верификация экспериментальными данными. В последних разделах приведены выводы и обсуждения выполненной работы.

1. Расчетная схема, принятые допущения, базовые расчетные зависимости. Прежде всего рассмотрим возможность ввода допущений, которые были бы направлены на минимизацию числа узлов конечно-элементной сетки при сохранении достаточно высокой точности расчетов. Как было отмечено выше, для указанного уменьшения необходимо принять в качестве первого допущения, что робот представляет собой не сборочную единицу, а единую монолитную деталь. Такое допущение необходимо для исключения образования контактных пар, которые, как правило, существенно увеличивают время расчетов, а также загромождают сетку конечных элементов в мелких деталях, к которым относятся все метизные элементы, прокладки, прижимные элементы и так далее. Такие детали обеспечивают неподвижные соединения и образуют единую жесткую конструкцию. Однако, например, соединение двух планок болтами отличается своей жесткостью от сварного соединения таких деталей по всей сопрягаемой плоскости. Однако возникающие в таком соединении силы нормального давления и трения образуют практически неподвижные друг относительно друга сопряжения, тем самым минимизируя указанные отличия. В этом случае жесткость двух планок как единой детали и планок, скрепленных болтами, практически не будет отличаться. Второе допущение связано с тем, что в процессе сверления перемещения звеньев робота малы по сравнению с размерами таких звеньев и размерами всего робота. Зачастую глубина просверливаемых отверстий не превышает нескольких десятков миллиметров. Размеры самих роботов варьируются от сотен до тысяч миллиметров. Таким образом, изменение общей геометрии робота в процессе сверления на один–два порядка меньше его габаритов. Это допущение дает основание полагать, что жесткость робота в момент начала сверления и к окончанию обработки практически не изменится. Кроме того, погрешности положения оси отверстия, его формы и формы самой поверхности отверстия образуются преимущественно в начальный момент обработки, то есть в пределах осевого перемещения сверла до одного–двух миллиметров, что еще более обосновывает справедливость данного допущения. Третье допущение следует из первого: у одной общей эквивалентной детали робота упругие свойства материалов его частей считаются одинаковыми. В настоящее время для изготовления роботов применяются как тради-

ционные гомогенные металлические, так и относительно новые гетерогенные материалы, например композиты. Модули упругости таких материалов широко варьируются. Единственным способом решения данной задачи по предлагаемому методу расчета пока можно признать применение усредненного модуля упругости у всего робота. Такое значение может быть получено на основании сравнения заявленной в паспорте робота величины его жесткости для заданного положения звеньев и расчетного по предлагаемой методике значения, например, для стальной конструкции. Полученный масштабный коэффициент и следует далее использовать в расчетах.

Принятые три допущения позволяют получить эквивалентную для заданного положения звеньев робота деталь, что и было положено в основу разработки расчетной модели. В соответствии с принятой методикой расчета первоначально необходимо получить облако узловых точек (узлов) вокселей рассматриваемого робота. Для получения таких узлов, принадлежащих телу эквивалентной детали робота, необходимо использовать САД-модель робота в текущем положении обработки. Обладателем такой модели является лишь разработчик робота, и такая модель не может быть опубликована для всеобщего использования. В связи с этим предлагается использовать два решения: первое заключается в том, что разработчики роботов должны открыто публиковать САД-модели упрощенных (эквивалентных) роботов, второе – разработчики должны публиковать воксельные или даже конечно-элементные сетки таких эквивалентных роботов. И первый, и второй варианты обеспечивают сохранность авторских прав разработчиков моделей роботов.

Ниже остановимся на первом варианте, когда САД-модель упрощенного (эквивалентного) робота известна. Уравнениями, определяющими принадлежность вокселя пространству эквивалентной детали, являются [22]:

$$x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \cup y_{\min} \leq y_i \leq y_{\max} \cup z_{\min} \leq z_i \leq z_{\max}, \quad (1)$$

$$x_{\min} = \min \{x(y_i, z_i)\}, \quad x_{\max} = \max \{x(y_i, z_i)\}, \quad (2)$$

$$y_{\min} = \min \{y(x_i, z_i)\}, \quad y_{\max} = \max \{y(x_i, z_i)\}, \quad (3)$$

$$z_{\min} = \min \{z(x_i, y_i)\}, \quad z_{\max} = \max \{z(x_i, y_i)\}, \quad (4)$$

где x_i, y_i и z_i – координаты каждой узловой точки i -го вокселя сетки воксельного пространства; $x(y_i, z_i)$, $y(x_i, z_i)$ и $z(x_i, y_i)$ – координаты точек поверхностей САД-моделей, определяемых по отдельности для соответствующих значений остальных двух в каждой тройке дискретно выбираемых координат узлов вокселей; \min и \max – означают экстремальные значения: для x , соответственно, в направлении слева и справа робота; для y , соответственно, спереди и сзади; для z , соответственно, снизу и сверху по каждой прямой линии внутри робота. На таких прямых линиях, параллельных координатным осям и проходящих через узел текущего вокселя с координатами (x_i, y_i, z_i) , определяются отрезки с точками на поверхностях всех деталей робота.

Для заполнения всего пространства робота вокселями используются простые зависимости:

$$x_i = x_{\min} + \Delta x, \quad y_i = y_{\min} + \Delta y, \quad z_i = z_{\min} + \Delta z, \quad (5)$$

где Δx , Δy и Δz – шаги воксельной сетки.

После расчета координат воксельной сетки эквивалентной детали робота далее по известным зависимостям определяются узлы и элементы его конечно-элементной модели. С учетом постоянства шагов элементов и параллельность их границ координатным осям, становится возможным и применение более экономичного в вычислительном плане метода конечных разностей.

Получив сетки конечных элементов роботов в момент начала сверления, необходимо дополнить расчетную схему условиями закрепления и нагружения. Обычно роботы прикрепляются к монтажным элементам болтами через имеющиеся в основаниях роботов отверстия. Учитывая первое допущение, представляется достаточным закрепить площадки вокруг данных болтов по всем шести степеням свободы. Нагрузка на роботы определяется силами резания и весом, действующим на звенья роботов. Определение силы резания является самостоятельным вопросом, который требует отдельного изучения и в данной работе не рассматривается. Считаем, что три составляющие силы резания известны и приложены к рабочему органу робота в месте крепления режущего инструмента. Расчет деформации робота от действия веса в целом не представляет затруднений: анало-

гично случаю модуля упругости можно применить эквивалентную плотность. Однако на точность обработки действие веса в целом не оказывает влияние. Отработка управляющей программы производится на конкретном роботе, и коррекция программы производится с учетом статического смещения звеньев робота от действия на его звенья веса. Большее влияние на точность обработки отверстий оказывает смещение инструмента в процессе его работы в связи с периодически меняющимися силами резания. Именно этот случай и рассматривается в данной работе. Расчет адекватной роботу конечно-элементной модели и будет решением поставленной выше задачи. Поскольку такая модель представляется упругой, то выбор направления силы резания и даже ее величины не является принципиальным вопросом. При увеличении величины силы, например, в десять раз деформации робота в силу действия закона Гука увеличатся пропорционально также в десять раз. Таким образом, в качестве четвертого допущения будем считать, что действием веса на звенья робота можно пренебречь, а в качестве силовой нагрузки использовать только три составляющие силы резания, действующие от инструмента на рабочий орган робота, при этом достаточно пока рассмотреть некоторую величину нагрузки, например 10 Н.

2. Результаты расчетов перемещения точек последнего звена робота в месте его соединения с рабочим органом и коррекция модели на основании экспериментальных данных. Для доказательства правомерности указанных выше подходов в качестве примера был рассмотрен робот «Умелец», изготовленный «Учтех-Профи» Южно-Уральского государственного университета (рис. 1, а). Данный робот позволяет перемещать рабочий орган по трем линейным координатам, что достаточно для сверления отверстий на некоторой плоской поверхности заготовки. Робот имеет три одинаковых звена, каждое из которых, в свою очередь, имеет привод продольного перемещения с шарико-винтовой парой (ШВП) и рельсовую направляющую HGR15H 8B408-2 от компании HIWIN (рис. 1, д). На базе имеющейся САД-модели робота (рис. 1, б) по приведенным выше формулам (1)–(5) была рассчитана воксельная (рис. 1, в) и далее конечно-элементная модели (рис. 1, г) данного робота. Внешний вид САД-модели отдельного звена робота, его воксельной сетки и его конечно-элементные сетки представлены на рис. 1, д. Все компоненты робота были изготовлены из стали, величина модуля упругости была принята $E = 210$ ГПа.

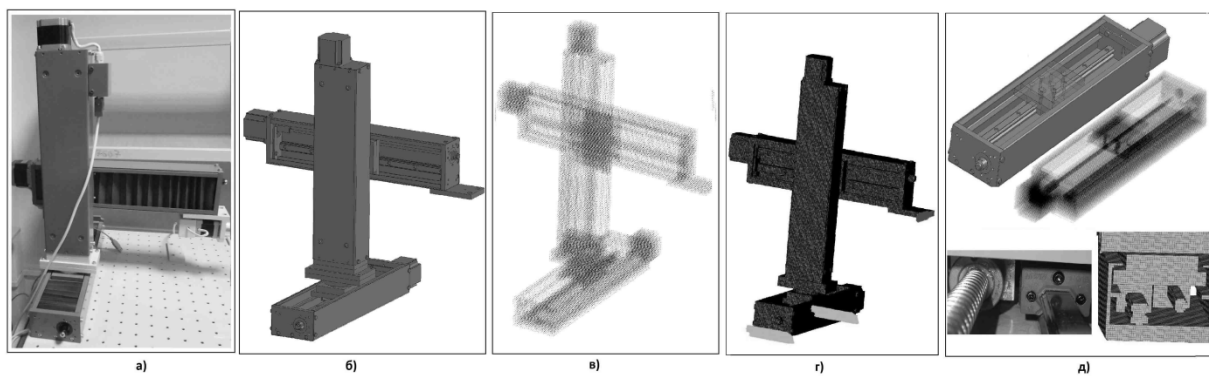


Рис. 1. Робот манипуляционный: а) общий вид, б) САД-модель робота, в) облако вокселей, г) конечно-элементная модель и нагрузки, д) САД-модель звена робота, его воксельная сетка, вид и модель шарниров

Расчет деформаций робота от горизонтальной силы $F_y = 10$ Н, направленной перпендикулярно предполагаемой оси сверления, выполненный с использованием доступной программы ANSYS Academic (размерность сетки один миллион элементов), показал, что перемещение конца последнего звена робота составляет по осям примерно: $U_{xp} = 12$ мкм, $U_{yp} = 34$ мкм и $U_{zp} = 0,4$ мкм (рис. 2).

Для последующей верификации данных расчетов были проведены эксперименты. С помощью прочной нити, поддерживающего блока, дополнительных приспособлений и эталонного груза массой 1 кг было приложено соответствующее усилие к данному роботу. Измерения перемещений производились индикатором часового типа ЛИЗ с ценой деления 1 мкм. Внешний вид экспериментальной установки приведен на рис. 3, а. Для исключения влияния деформаций испытательного стола и других элементов приспособления были проведены дополнительные измере-

Численные методы моделирования

ния перемещений робота при нагружении самого стола без робота. Такие показания индикатора вычитались из показаний, полученных при перемещении робота от приложенной к нему нагрузки. В результате измерений были получены следующие перемещения рабочего органа собственно самого робота: $U_{xэ} = 135\text{мкм}$, $U_{yэ} = 285\text{мкм}$, $U_{zэ} = 5\text{мкм}$. Таким образом, оказалось, что экспериментальные величины на порядок отличаются от результатов, полученных в расчетах.

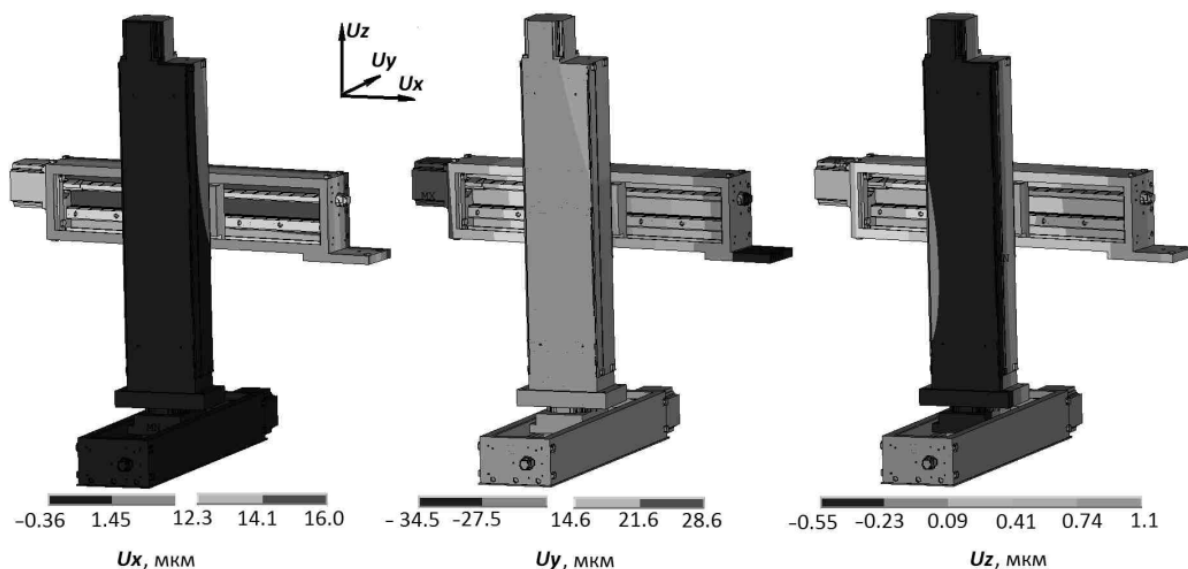


Рис. 2. Деформации робота манипуляционного по трем координатным осям от силы F_y

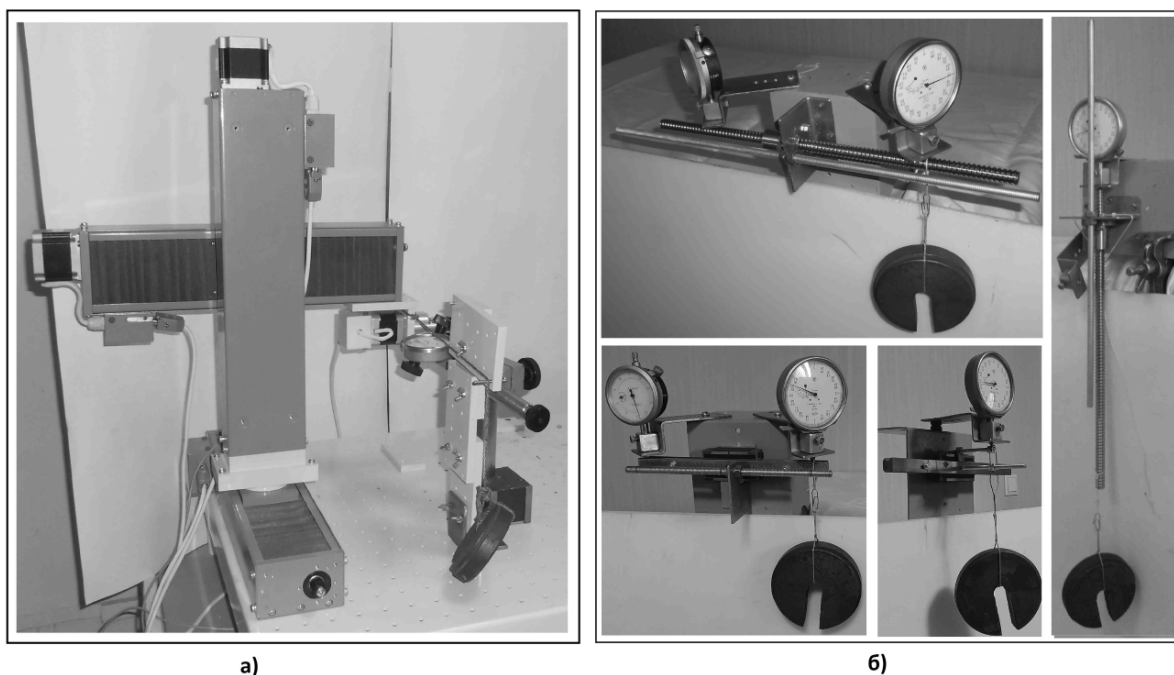


Рис. 3. Экспериментальное определение перемещений: а) робота манипуляционного в целом, б) отдельно шарико-винтовой пары и направляющего механизма этого робота

Полученные результаты показали, что применение методики расчета жесткости робота как единой монолитной детали оказывается в подобном случае неприемлемым. В связи с этим необходимо было определить причину таких существенных расхождений расчетных и экспериментальных данных. Как и следовало ожидать, наибольшее влияние на перемещения оказали контактные пары робота: шарниры и направляющие элементы для движения его звеньев, указанные выше. Для практических целей сведения о жесткости элементов приводов и шарниров должны

быть предоставлены их производителями. Однако таких сведений в литературе найти не удалось. Соответственно, для оценки собственной жесткости деталей робота возникла необходимость в изготовлении отдельного испытательного стенда для определения перемещений данных элементов робота и последующих их расчетов. Были изготовлены испытательные приспособления для определения перемещений в шарико-винтовой паре (рис. 3, б, вверху и справа) и рельсовой направляющей HIWIN (рис. 3, б, внизу, слева). Нагрузению подвергались как элементы указанных узлов, так и элементы самого приспособления для оценки влияния деформаций собственно этого приспособления. К таким элементам дополнительного нагружения относились резьбовые винты, закрепленные параллельно винту ШВП или направляющему рельсу. К концам резьбовых винтов на расстояниях, равным расстояниям до точек нагружения винта ШВП или рельса, прикладывалась та же самая нагрузка – 10 Н. В каждом из указанных выше экспериментов проводилось по 10 параллельных опытов (опыты при неизменных факторах). Для каждого эксперимента определялась среднеарифметическая величина и производилась проверка на промахи.

На основании результатов данных экспериментов были итерационно подобраны эквивалентные геометрические формы, реализованные в CAD-моделях отдельно для шарико-винтовой пары и рельсовой направляющей. Для таких CAD-моделей и были далее выполнены расчеты перемещений аналогичных экспериментальным точкам элементов конструкций (рис. 4.) Перемещения в экспериментах $U_{\text{э}}$ и перемещения расчетные $U_{\text{р}}$ для пяти случаев нагружения оказались следующими, в мкм: а) $U_{\text{э}} = 231$, $U_{\text{р}} = 355$; б) $U_{\text{э}} = 3$, $U_{\text{р}} = 0,1$; в) $U_{\text{э}} = 72$, $U_{\text{р}} = 157$; г) $U_{\text{э}} = 6$, $U_{\text{р}} = 7$; д) $U_{\text{э}} < 1$, $U_{\text{р}} = 0,4$. Несмотря на относительно больше расхождения, корреляция представляется очевидной. Более точный подбор геометрических параметров данных узлов возможен при использовании полноценной коммерческой версии ANSYS, в которой имеется лицензия на модуль оптимизации, и, таким образом, такое уточнение не представляет собой трудностей научного порядка. В то же время следует отметить, что более точные расчеты не являются необходимыми, поскольку экспериментальные данные могут варьироваться в широких пределах в зависимости от конкретной сборки соединения и его текущего состояния в процессе эксплуатации конкретного робота. Более важным является получение универсальной методики расчета, в которой такие частные отличия не окажут принципиального влияния. Таким образом, именно эти, полученные выше для исследуемых узлов решения, рассмотрены далее.

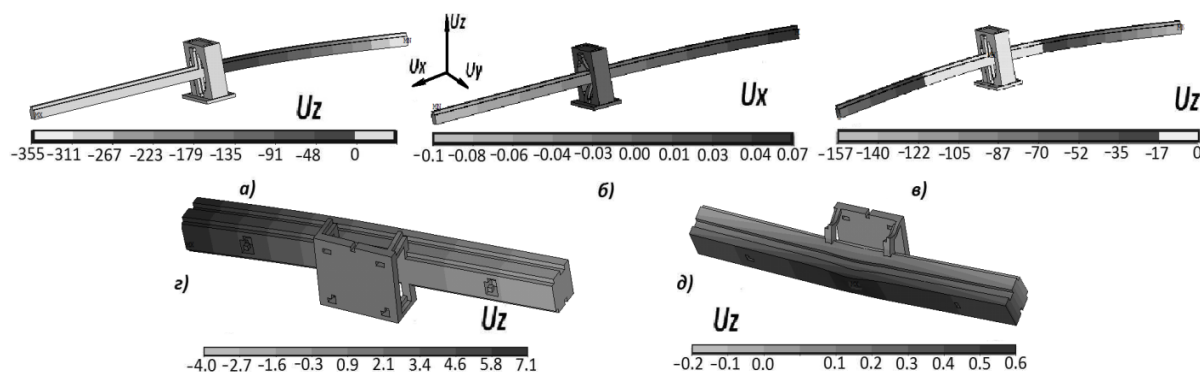


Рис. 4. Деформации эквивалентных контактных пар робота манипуляционного по трем осям, в мкм: а) от одной изгибающей винт ШВП силы, б) от одной растягивающей винт ШВП силы, в) от двух изгибающих винт сил, г) от одной изгибающей рельс силы и д) от скручивающего в центре рельса момента сил

3. Результаты скорректированных расчетов перемещения точек последнего звена робота в месте его соединения с рабочим органом и их верификация экспериментальными данными. Скорректированные CAD-модели роботов с эквивалентными по жесткости подвижными контактными парами были использованы далее для расчета по формулам (1)–(5) воксельных и конечно-элементных сеток. На основе расчетов были получены величины перемещений контрольных точек присоединения рабочих органов для различных положений звеньев и различных направлений векторов нагрузок, представленные на рис. 5 и в таблице. В таблице также представлены результаты экспериментальных данных, полученные на основе положений робота, показанных на рис. 6.

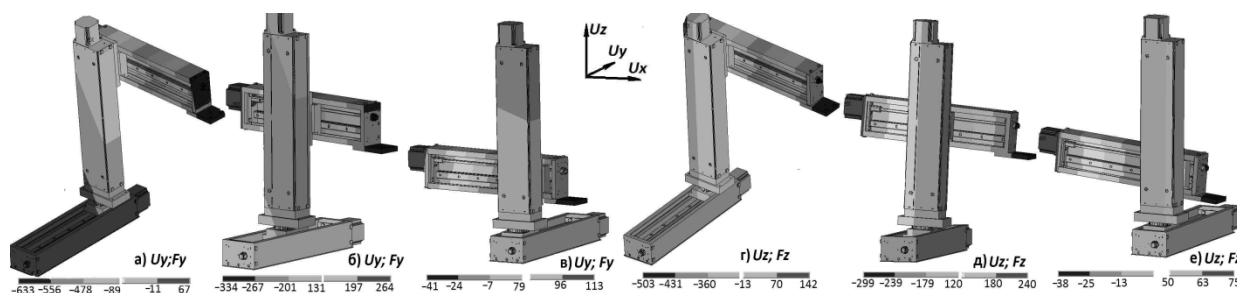


Рис. 5. Деформации робота по осям U_y и U_z от сил F_y и F_z в положениях звеньев, в мкм: а и г – крайнее к двигателю; б и д – по середине; в и е – крайнее от двигателя

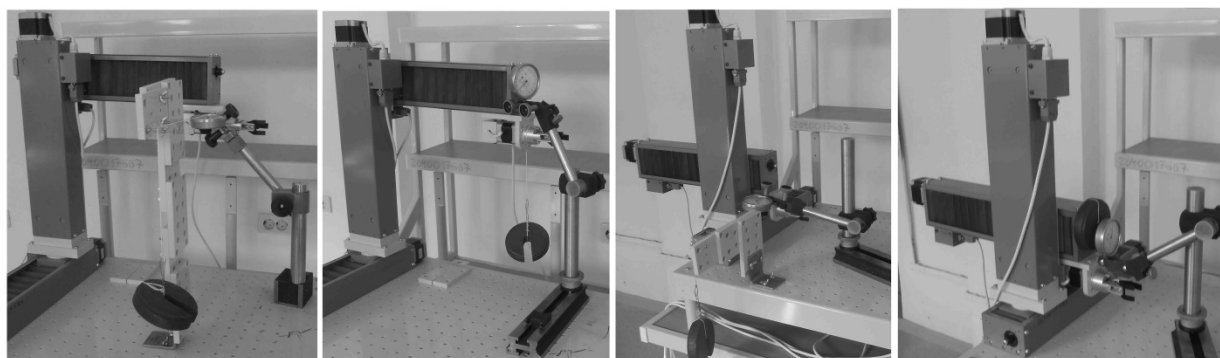


Рис. 6. Экспериментальное определение деформации робота по осям U_y и U_z от сил F_y и F_z в положениях звеньев крайнее к двигателю и крайнее от двигателя

Перемещения контрольных точек звена в местах присоединения рабочего органа робота, мкм

Показатели измерений в экспериментах и расчетах, и отклонения между ними	Положения звеньев и вектора сил					
	крайнее к двигателю		по середине		крайнее от двигателей	
	F_y	F_z	F_y	F_z	F_y	F_z
Эксперимент по оси Y , $U_{yэ}$	648	27	285	17	37	8
Расчет по оси Y , U_{yp}	633	17	334	6	40	2
Эксперимент по оси Z , $U_{zэ}$	1	610	5	285	1	44
Расчет по оси Z , U_{zp}	19	503	2	299	0.5	37
Эксперимент итоговый вектор, $U_{э} = \sqrt{U_{yэ}^2 + U_{zэ}^2}$	648	611	285	286	37	45
Расчет итогового вектора, $U_{p} = \sqrt{U_{yp}^2 + U_{zp}^2}$	633	503	334	299	40	37
Отклонение итоговых векторов, $100(U_{э} - U_{p})/U_{э}, \%$	2,3	17,7	-17,2	-4,5	-8,1	17,8

Отклонения суммарных векторов перемещений контрольных точек мест присоединения к последнему звену робота его рабочего органа варьируются от 2,3 до 17,8 %. Последнее значение представляется значительным, однако и такой результат можно признать пока удовлетворительным для целей технологов. Например, технолог может выполнить расчет и установить, что от радиальной составляющей суммарной силы резания на сверле 10 Н сверло может быть смещено на величину $0,33 \pm 0,06$ мм. Величина 0,33 мм сравнивается с позиционным допуском на размере отверстия, на основании чего технолог может принять более обоснованное решение о целесообразности дополнительных мероприятий, направленных на обеспечение позиционного допуска на чертеже детали. При допуске менее 0,25 мм такие мероприятия необходимы. При допуске

0,25...0,4 мм решение неоднозначное, необходимо дополнительное изучение или опытная отладка операции. При допуске свыше 0,4 мм вероятность появления брака минимальна.

Выводы:

1. Предложенный способ получения малоразмерных конечно-элементных сеток манипуляционных роботов на основе воксельных моделей деталей-эквивалентов таких роботов является достаточным для определения их жесткости и выполнения точностных расчетов технологов, что подтверждается тестовыми испытаниями на примере трех-координатного робота, в которых отклонения тестовых расчетных и экспериментальных данных не превысили 18 %.

2. Для обеспечения требуемой точности расчетов жесткости роботов необходимо дополнительно использовать эквивалентные по жесткости сборки их шарнирных соединений, при этом такие САД-модели должны быть заранее опубликованы производителями данных узлов.

Обсуждение и применение. Проведенные исследования по расчетному определению жесткости манипуляционных роботов показали, что принятые выше четыре допущения позволяют решить поставленную задачу, а именно на компьютерной технике, используемой инженерами-технологами, произвести расчет сетки конечных элементов роботов в текущем положении их звеньев для обработки отверстий сверлением на заданном переходе технологической операции и, таким образом, далее рассчитать возможные максимальные смещения сверл и осей получаемых отверстий. Однако вопросы, связанные с податливостью шарниров, требуют дальнейшего изучения, поскольку влияние такой податливости на жесткость роботов существенно, а степень формализации является все еще недостаточно полной.

Литература/References

1. Karabegovic I., Karabegovic E., Husak E. Trend of Industrial Robot Share in Different Branches of Industry in America. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2012, vol. 2, iss. 2, pp. 479–485.

2. Statistics, Market Analysis, Forecasts and Case Studies. World Robotics. Industrial Report 2020. *IFR Press Conference*. 24th September 2020. Frankfurt, 2020. 32 p.

3. Baier C., Hähn F., Tepper C. Weigold M. Robot-Based Hybrid Production Concept. *In. Production at the leading edge of technology*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2019. 639 p. DOI: 10.1007/978-3-662-60417-5_45

4. KUKA. Robots. KR QUANTEC extra. With F and C variants. Specification, 2018. 297 p.

5. Prabhu N., Dev Anand M., Ezhil Ruban L. Structural analysis of Scorbot-ER Vu plus industrial robot manipulator. *Production & Manufacturing Research*, 2014, vol. 2, iss. 1, pp. 309–325. DOI: 10.1080/21693277.2014.907533

6. Pupaza C., Constantin G., Negriță S. Computer aided engineering of industrial robots. *Proceedings in Manufacturing Systems*, 2014, vol. 9, pp. 87–92.

7. Sun L., Fang L. An approximation method for stiffness calculation of robotic arms with hybrid open- and closed-loop kinematic chains. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10, iss. 2, pp. 1–12. DOI: 10.1177/1687814018761297

8. Zhang J., Cai J. Error Analysis and Compensation Method Of 6-axis Industrial Robot. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 2013, vol. 6, pp. 1383–1399. DOI: 10.21307/ijssis-2017-595

9. Zhou E., Wang X., Fang H., He K. Finite Element Modal Analysis of an Eight-axis Industrial Robot Painting System Applied to Boarding Bridge Painting. *In. Current Trends in Computer Science and Mechanical Automation*, vol. 2, pp. 408–417. DOI: 10.1515/9783110584998-043

10. Akkus N., Ozer O., Temiz I. Development of A SCARA Robot with Extensible Arm. *International Journal Of Engineering Research and Applications*, 2018, vol. 8, iss. 7, part V, pp. 56–61. DOI: 10.9790/9622-0807055661

11. Singh A., Arora R., Chouhan Y.S. Design and Static Analysis of Robotic Arm using Ansys. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 2020, vol. 9, iss. 1, pp. 626–630. DOI: 10.35940/ijrte.A1768.059120

12. Arora R., Dhani S.S. Finite Element Analysis and Multibody Dynamics of 6-DOF Industrial Robot. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 2017, vol. 4, pp. 1–12. DOI: 10.24247/ijmperdoct20171

13. Bugday M., Karali M. Design optimization of industrial robot arm to minimize redundant weight. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2019, vol. 22, pp. 346–352. DOI: 10.1016/j.jestch.2018.11.009
14. Chander P.R., Reddy Y.M.M., Ahmed S.S. Modeling and Model Analysis of an Industrial Robot Arm for Pick and Drop Circular Motion Using Different Materials. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 8, iss. 6, pp. 4514–4520. DOI: 10.35940/ijeat.F8006.088619
15. Choong W.H., Yeo K.B. Structural Design for a 3DOF Robot Lower-Arm via Computer Aided Engineering. *Centre of Materials & Minerals*, 2007, pp. 8–18.
16. Ghiorghe A. Optimization design for the structure of an RRR type industrial robot. *U.P.B. Sci. Bull*, 2010, Series D, vol. 72, iss. 4, pp. 121–134.
17. Hsiao J.C., Shivam K., Chou C.L., Kam T.Y. Shape Design Optimization of a Robot Arm Using a Surrogate-Based Evolutionary Approach. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, iss. 7, pp. 1–17. DOI:10.3390/app10072223
18. Jain R., Zafar M.N., Mohanta J.C. Modeling and Analysis of Articulated Robotic Arm for Material Handling Applications. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 691, pp. 1–8. DOI: 10.1088/1757-899X/691/1/012010
19. Raza K., Khan T.A., Abbas N. Kinematic analysis and geometrical improvement of an industrial robotic arm. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2018, vol. 30, pp. 218–223. DOI: 10.1016/j.jksues.2018.03.005
20. Sahu S., Choudhury B.B. Static analysis of a 6 – axis industrial robot using finite element analysis. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2017, vol. 8, iss. 3, pp. 49–55.
21. Linear Motion Technology Handbook. Bosch Rexroth AG. R310EN, 2017. 352 p.
22. Shchurova E.I. Industrial Manipulating Robot Finite Element Mesh Generation Based on Robot Voxel Model. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020): Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2020, pp. 232–239. DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_27

Щурова Екатерина Игоревна, аспирант кафедры «Технология автоматизированного машиностроения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, shchurovaei@susu.ru.

Поступила в редакцию 18 мая 2021 г.

DOI: 10.14529/engin210207

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF MANIPULATING ROBOTS RIGIDITY IN DRILLING

E.I. Shchurova, shchurovaei@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Manipulating robots are still not widely used in machining, including drilling. The major reason for this is relatively low rigidity of robots. Low rigidity results in low accuracy of the workpiece machined surfaces, including the accuracy of hole axes position. In this regard, the computational prediction of possible drill shift in machining using robots is an urgent problem of mechanical engineering. The most accurate method for prefabricated structures rigidity calculation is the finite element method. However, the consequences of robot finite element meshes generation based on robot CAD models are the meshes consisting of several million elements. Computers currently used by technologists cannot perform such cumbersome calculations. Consequently, the problem arises to perform such calculations using adequate smaller-sized meshes. The paper proposes a method for mesh generation based on voxel modeling, namely, on obtaining a cloud of voxel nodal points using robot CAD model. Robot voxel model was obtained using four assumptions, including: replacing the robot assembly with the equivalent part; the use of hinges equivalent in rigidity obtained from experiments; invariability of the position of the robot

links during drilling process. Based on the model regular finite element meshes of up to one million elements were generated. The verification of this calculation method was carried out for displacements of the end link of a three-axis robot. The deviations of the calculated and experimental data do not exceed 18%. Taking into account many difficult-to-formalize calculation factors, for example, cutting forces, this deviation is acceptable for predicting the accuracy the hole axis location in drilling with the use of robots. Consequently, the proposed calculation method is promising for the pre-production engineering.

Keywords: manipulating robot, drilling, robot rigidity, finite element method, voxel modeling.

Received 18 May 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Щурова, Е.И. Расчетное и экспериментальное определение жесткости манипуляционных роботов, применяемых для операций сверления / Е.И. Щурова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 60–71. DOI: 10.14529/engin210207

FOR CITATION

Shchurova E.I. Computational and Experimental Determination of Manipulating Robots Rigidity in Drilling. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 60–71. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin210207.
