

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАРЕЗАНИЯ РЕЗЬБЫ МЕТЧИКОМ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЕЕ ПРИВЕДЕННОГО СРЕДНЕГО ДИАМЕТРА

И.А. Щуров, И.С. Болдырев

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Разработка операций нарезания высокоточной резьбы метчиками включает в себя прогнозирование такой точности. Чаще всего для этого приходится проводить дорогостоящие натурные эксперименты. Получившие в последнее время широкое применение численные методы расчета позволяют заменить эти эксперименты компьютерным моделированием. Однако данное моделирование сейчас связано преимущественно с определением напряжений и прочности инструментов, для чего моделируются лишь сам режущий инструмент и фрагмент заготовки. Такой подход оказывается неприемлемым для прогнозирования точности обработки, поскольку погрешности размеров и формы резьбы существенно зависят от фактического движения инструмента, которое, в свою очередь, зависит от условий его закрепления в шпинделе станка. В связи с этим встала задача моделирования не только указанных элементов технологической системы, но и вспомогательного инструмента. Кроме того, после расчета поверхности резьбы детали необходимо рассчитать и ее точностные характеристики. Именно эти вопросы рассмотрены в данной статье: показаны результаты конечно-элементного моделирования нарезания резьбы метчиком, закрепленным в резьбонарезном патроне плавающе-качающегося типа. Полученные графики осевой силы и крутящего момента соответствуют ожидаемым кривым как по ее форме, так и по числовым значениям. Полученное облако точек резьбы позволило далее рассчитать ее приведенный средний диаметр, который оказался сопоставимым с соответствующим диаметром метчика и аналогичным размером резьбы из государственного стандарта. Таким образом, приведенные расчеты показывают свою реалистичность и возможность применения в практике проектирования резьбонарезных операций.

Ключевые слова: резьбонарезание, качество резьбы, приведенный средний диаметр резьбы, метод конечных элементов, моделирование резьбонарезания.

Введение. Нарезание на станках внутренних резьб является одним из широко распространенных процессов технологии машиностроения. Несмотря на широкое применение операций резьбофрезерования и резьботочения [1–6], резьбонарезание метчиками все еще широко используется, в особенности для получения резьбовых отверстий малого диаметра. Несмотря на почти вековую историю исследований этого процесса, большая часть задач, связанных с силами резания и точностью получаемых поверхностей, все еще не решена [7]. Это обусловлено не только наличием одной из самых сложных поверхностей у данных многозубых инструментов, но и специфическими условиями стесненного стружкообразования при работе одновременно главной и двумя вспомогательными режущими кромками каждого зуба таких инструментов. У получаемых метчиками резьб имеется один из наиболее сложных показателей точности, а именно – приведенный средний диаметр. Согласно ГОСТ 11708-82 этот диаметр является комплексным показателем точности, поскольку представляет собой собственно средний диаметр идеального калибра, без натяга или зазора ввинченного в изменяемую резьбу. Таким образом, этот размер зависит как от собственно среднего диаметра реальной резьбы, зависящего, в свою очередь, от ее диаметров, ее шага, углов профилей, так и от погрешностей в радиальных сечениях и даже от изгиба оси такой реальной резьбы на всей длине ее свинчивания. Согласно схемам В.В. Матвеева [8] и других исследователей [9] приведенный средний диаметр зависит от трех обобщенных факторов первого уровня: производящего размера метчика, погрешностей его винтового движения и деформаций заготовки. Первый такой фактор, в свою очередь, зависит от двух факторов второго уровня: размеров метчика до начала обработки и изменения этих размеров в процессе работы инструмента, что связано с тепловыми, упругими деформациями и износом. Второй фактор первого уровня связан как с линейными перемещениями метчика вдоль его оси и по радиусу, так и с вращением

Численные методы моделирования

метчика вокруг трех осей. Наконец, третий фактор первого уровня также условно может быть разделен по физике воздействия на тепловые и упругие деформации заготовки. Как видно из простого перечисления данных факторов, они имеют различные природу и проявления; их воздействие оказывается одновременным, и, таким образом, расчет их влияния на точность резьбы по отдельности трудно реализуем и не целесообразен.

В связи с этим оказывается более целесообразным произвести учет влияния всех этих факторов на точность резьбы одновременно. Такой учет возможен при использовании численных методов расчета: для решения физических задач целесообразно применить, например, такие сеточные методы, как метод конечных элементов, а для решения геометрических задач целесообразно применить метод дискретного твердотельного моделирования [9]. Данные подходы уже нашли широкое применение, например, в оценках прочности режущих и бесстружечных метчиков [10–17]. В данных работах на основе CAD-моделей метчиков были получены их конечно-элементные модели и с использованием таких же моделей кольцевых заготовок выполнены расчеты сил резания и напряжений при резбонарезании. Основная задача всех этих работ – расчет сил и крутящих моментов для последующего определения напряжений и решения вопроса прочности инструментов.

Вместе с тем, помимо прочностных вопросов в обработке метчиками высокоточных резьб обязательно присутствует и вопрос обеспечения такой точности. Данные вопросы также нашли отражение в ряде публикаций [18, 19]. В одной из таких работ решается задача точности с применением классического твердотельного моделирования [18]. Метчик с заданной геометрией моделируется в коммерческой CAD-программе, и далее моделируется его винтовое движение. Используя булеву операцию разности областей, авторы находят подобласть, занимаемую получаемой резьбовой заготовкой. В данной работе дается оценка углов профилей получаемой резьбы, однако в целом ее точность так и не оценивается. Кроме того, в данной работе не учитывается влияние сил резания на деформации инструмента и заготовки, а также не учитываются все погрешности формообразующего движения инструмента. В другой работе выполнен расчет сил резания по эмпирическим формулам с использованием эмпирических коэффициентов [19]. Также в квазистатической постановке выполнено и моделирование получаемой в ходе резания винтовой линии резьбы. Дается оценка отклонения полученной винтовой линии резьбы от идеальной винтовой линии заданных шагов и диаметра. Такая оценка может быть некоторым приближением для оценки точности резьбы, но в целом такое решение все еще далеко от понятия приведенного среднего диаметра. Кроме того, расчет сил резания по эмпирическим формулам с эмпирическими коэффициентами представляется недостаточно точным и всеобъемлющим решением.

Одной из особенностей решения задачи прогнозирования точностных показателей получаемой резьбы является необходимость учета влияния вспомогательных инструментов. В практике точного резбонарезания обеспечение высокой степени соосности рабочей части метчика и отверстия заготовки часто является трудноразрешимой проблемой. О значимости такой проблемы известно, в частности, в случае использования многшпиндельных автоматов и полуавтоматов. Здесь отклонение осей указанных элементов технологической системы может достигать одного миллиметра. В других случаях отклонения оказываются меньшими, но и они оказывают заметное влияние на изгиб метчиков. В связи с этим на практике широкое применение находят резбонарезные патроны с упругими компенсаторами. В процессе резбонарезания силы резания на метчике разворачивают его так, что его ось практически совпадает с осью отверстия заготовки. При этом все существенные деформации реализуются в упругих компенсаторах резбонарезных патронов. Исходя из этого, представляется уместным выполнять моделирование резбонарезания с учетом действия таких компенсаторов.

Приведенные выше обстоятельства позволяют определить **цель** настоящего исследования. Ею стала разработка методики численного моделирования процесса нарезания резьбы метчиками с учетом действия компенсаторов резбонарезных патронов для последующего прогнозного расчета ее приведенного среднего диаметра. Для достижения данной цели были решены следующие задачи. Во-первых, описаны с использованием классического твердотельного моделирования заготовка, метчик и элементы резбонарезного патрона, включая упругий компенсатор в виде круглой пластины с отверстиями. Во-вторых, получены необходимые конечно-элементные модели, приняты модели материалов и выполнены расчеты резьбообразования с получением резьбы

детали. В-третьих, на основе полученных расчетов конечно-элементной модели резьбовой детали рассчитан приведенный средний диаметр этой резьбы. Все эти задачи последовательно отражены в последующих разделах данной публикации.

1. Описание геометрической модели, конечно-элементной модели, свойств материала, граничных условий. Для моделирования процесса резьбонарезания метчиком в заготовке резьбы М20 х 2,5 использовался метод конечных элементов с удалением материала этой заготовки. В расчетах использовалась программа LS-Dyna. Трехмерная CAD-модель метчика представлена на рис. 1а. При закреплении заготовки, например, в виде гайки на станке всегда возникает несовпадение осей метчика и этой заготовки. В связи с этим в данных расчетах ось гайки, для примера, была смещена в радиальном направлении на величину 0,5 мм относительно ее идеального положения, то есть относительно оси метчика. Хвостовик твердотельной модели метчика был размещен в отверстии резьбонарезного патрона с упругим элементом в виде круглой пластины. Деформации такой пластины позволяют входящему в отверстие метчику отклоняться от начальной оси и принимать требуемое положение в отверстии заготовки. Принятые в расчетах параметры метчика имели следующие величины: резьба метрическая левая имела диаметр М20, шаг 2,5 мм. Метчик имел четыре прямые стружечные канавки. Остальные параметры метчика соответствовали метчику с номером 2621–1732 по ГОСТ 3266-81. Резьбонарезной патрон и его составные детали имели размеры по ОСТ-84-2029-89. Обозначение патрона по данному ОСТ: РБДИ.291133.049.

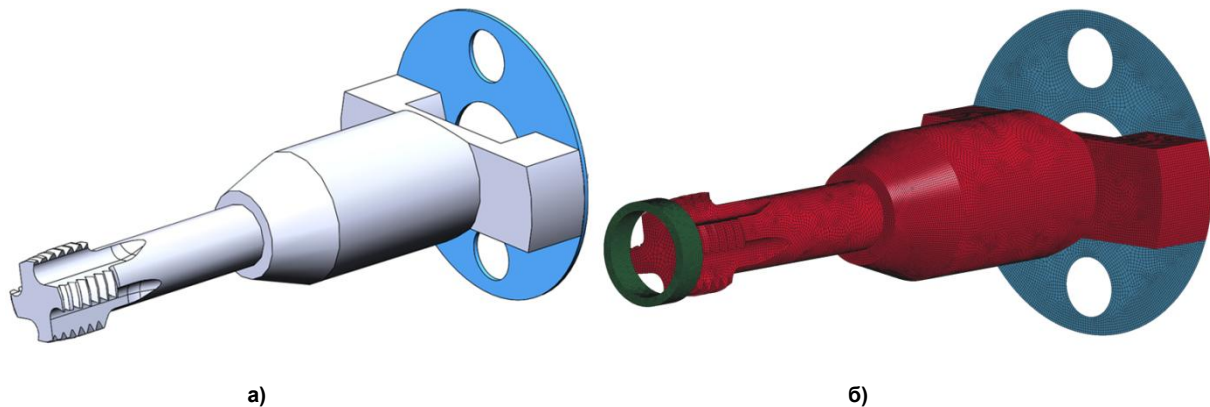


Рис. 1. Метчик М20, оправка и упругая пластина компенсатора для уменьшения разбивания резьбы (а), их конечно-элементная сетка с сеткой кольцевой заготовки (б)

Для моделирования процесса резания метчиком использовался метод конечных элементов, реализованный в программе LS-Dyna. Стружкообразование моделировалось путем удаления элементов заготовки, чьи пластические деформации достигали величины 25 %.

На следующем этапе была создана конечно-элементная модель всех указанных элементов технологической системы (рис. 1б). Модель заготовки представляет собой гайку в форме кольца с наружным диаметром 22 мм и длиной 7 мм. Заготовка была разбита на 1,5 миллиона восьмиугольных конечных элементов, средний шаг сетки равнялся 75 мкм. Метчик, оправка и пластина были разбиты на 4-узловые оболочечные элементы. Материал метчика и оправки был принят абсолютно жестким, то есть недеформируемым. Материал упругой пластины (компенсатора) толщиной 2 мм был абсолютно упругим с модулем упругости $E=2 \cdot 10^{11}$ Па и коэффициентом Пуассона 0,3. Модель материала заготовки соответствовала углеродистой стали (в LS-Dyna – plain carbon steel). Модель материала заготовки была принята с билинейным кинематическим упрочнением с модулем упругости $E=2 \cdot 10^{11}$ Па и модулем упрочнения $E_1=200$ МПа, коэффициент Пуассона заготовки также был равен 0,3. Модель материала показана на графике (рис. 2).

Заготовка закреплялась по наружной цилиндрической поверхности по всем степеням свободы. Закрепление пластины осуществлялось по крепежным отверстиям (два из имеющихся четырех), поскольку по этим отверстиям пластина жестко крепится винтами к вращающейся в станке жесткой части резьбонарезного патрона. В процессе моделирования метчик совершал два движения: прямолинейное движение подачи вдоль оси шпинделя станка и согласованное с таким движением вращательное движение вокруг указанной оси. За один оборот метчик перемещался по

Численные методы моделирования

его оси на шаг нарезаемой резьбы равный 2,5 мм. Общая величина перемещения метчика составила 15 мм, угловая скорость вращения была принята 36 рад/с.

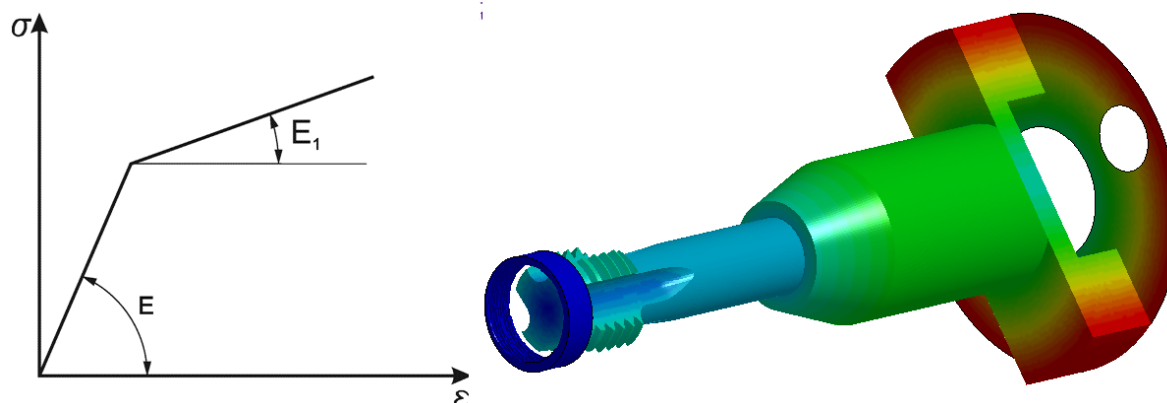


Рис. 2. Кривая деформирования материала заготовки (а) и картина результирующих перемещений в системе (б)

2. Результаты численного моделирования резбонарезания метчиком. В результате численного моделирования определено напряженно-деформированное состояние заготовки в каждый момент времени обработки. Распределение эквивалентных напряжений на резьбовом участке заготовки показано на рис. 3. Также в результате расчета получены графики зависимости крутящего момента на метчике и осевой силы резания от времени работы инструмента (рис. 4). Качественно эти зависимости хорошо согласуются с экспериментальными данными других авторов [20].

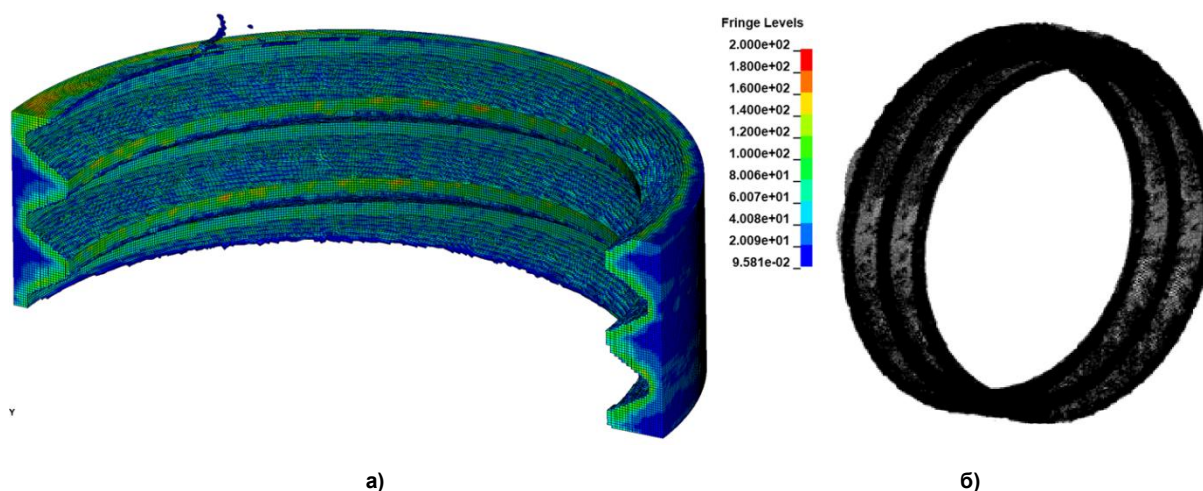


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений в заготовке после обработки в разрезе (а) и облако точек для расчета приведенного среднего диаметра (б)

3. Расчет приведенного среднего диаметра резьбы. В результате моделирования методом конечных элементов процесса резбонарезания метчиком было получено множество узлов детали. Расчеты на восьмиядерном процессоре выполнялись более 30 суток. Далее из полученной сетки заготовки по принципу отбора узлов с минимальными величинами радиус-векторов для каждой пары значений координат цилиндрической системы были выбраны узлы, принадлежащие резьбовой поверхности гайки (рис. 4б). Для расчета приведенного среднего диаметра резьбовой поверхности был использован ранее разработанный нами метод [9, 20]. Согласно стандарту ГОСТ 24705-2004 (ISO 724:1993) средний диаметр резьбы M20 x 2,5 должен быть равен 18,376 мм. Однако согласно расчетам по указанной методике у полученной резьбовой поверхности приведенный средний диаметр оказался меньше и равным 18,326 мм.

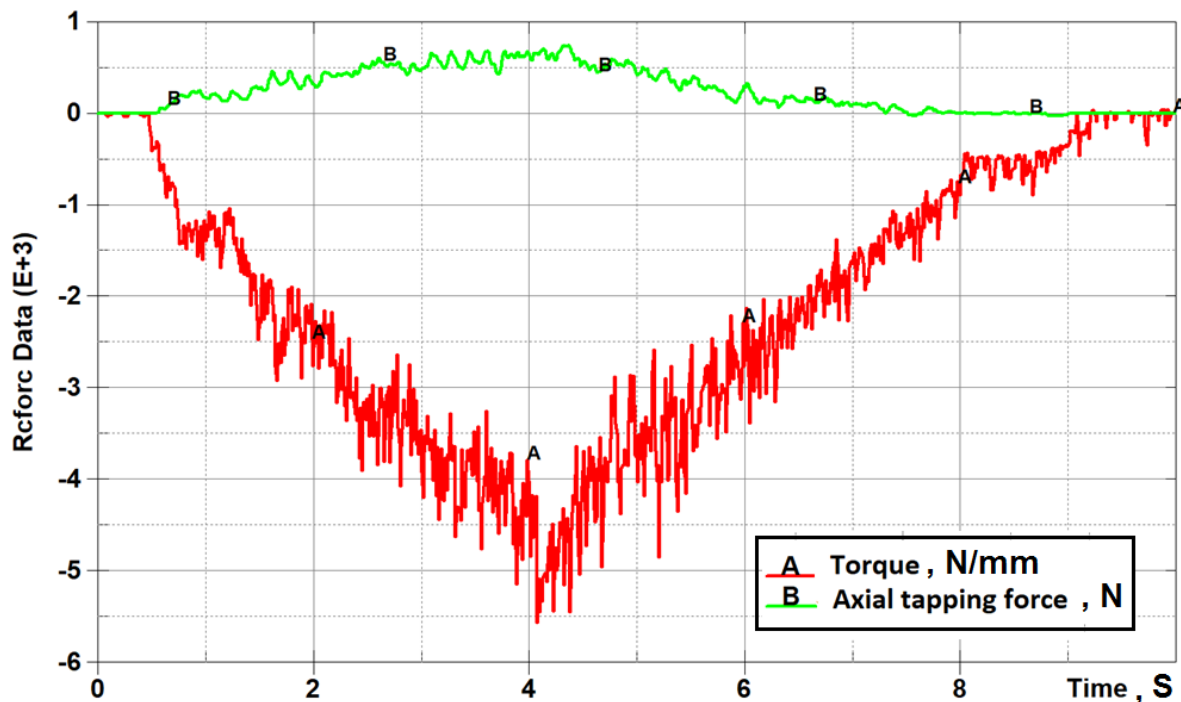


Рис. 4. Зависимость крутящего момента и осевой силы резания на метчике от времени резания

4. Обсуждение полученных результатов CAD моделирования. Полученный результат оказался парадоксальным, поскольку оказался на 0,05 мм меньше стандартного размера. В связи с этим был выполнен расчет приведенного среднего диаметра метчика. Данный диаметр оказался равным 18,311 мм. Таким образом, полученный выше результат теперь представляется правдоподобным, а методика расчета обнадеживающей и потенциально применимой на практике.

5. Вывод

Метод прогнозирования точности получаемой в рассматриваемой технологической операции резьбы путем расчета ее приведенного среднего диаметра на основе конечно-элементных расчетов процесса нарезания с учетом действия упругих компенсаторов резьбонарезных патронов является достаточным для практического использования. Однако продолжительность такого моделирования еще достаточно высока и требует применения высокопроизводительной вычислительной техники.

Литература

1. Fromentin, G. Modeling of interferences during thread milling operations / G. Fromentin, G. Poulachon // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2010. – Vol. 49. – P. 41–51. DOI: 10.1007/s00170-009-2372-5.
2. Lee, W.S. Simulation-aided design of thread milling cutter / W.S. Lee, A. Nestler // *Procedia CIRP.* – 2012. – Vol. 1. – P. 120–125. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.019.
3. Wan, M. Mechanics and dynamic of thread milling process / M. Wan, Y. Altintas // *Int. J. Mach. Tools Manuf.* – 2014. – Vol. 87. – P. 16–26. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2014.07.006.
4. Khoshdarregi, M.R. Generalized modeling of chip geometry and cutting forces in multi-point thread turning / M.R. Khoshdarregi, Y. Altintas // *Int. J. Mach. Tools Manuf.* – 2015. – Vol. 98. – P. 21–32. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.08.005.
5. Jun, M.B.G. Modeling of the thread milling operation in a combined thread/drilling operation: thrilling / M.B.G. Jun, A.C. Araujo // *Trans. ASME J. Manuf. Sci. Eng.* – 2010. – Vol. 132. – 014505. DOI: 10.1115/1.4000944.
6. Araujo, A.C. Analytical and experimental investigations on thread milling forces in titanium alloy / A.C. Araujo, G. Fromentin, G. Poulachon // *Int. J. Mach. Tools Manuf.* – 2013. – Vol. 67. – P. 28–34. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.12.005.

7. Armarego, E. *Predictive Cutting Models for the Forces and Torque in Machine Tapping with Straight Flute Taps* / E. Armarego, M.N. Chen // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2002. – Vol. 51. – No. 1. – P. 75–78. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61469-3.

8. Матвеев, В.В. *Нарезание точных резьб* / В.В. Матвеев. – М.: Машиностроение. – 1978. – 88 с.

9. Щуров, И.А. *Расчет точности обработки и параметров инструментов на основе дискретного твердотельного моделирования: монография* / И.А. Щуров. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. – 2004. – 320 с.

10. Czarnecki, H. *FEM simulation of material strain in corner of forming tap during cold thread shaping* / H. Czarnecki, K. Tubielewicz, A. Zaborski et al. // *Tribologia*. – 2019. – Vol. 288. – P. 5–16. DOI: 10.5604/01.3001.0013.7759.

11. Demirel, T. *Finite element simulation of stresses in cutting tools during tapping* / T. Demirel, S. Yagmur, Y. Kayir et al. // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. – 2022. DOI: 10.1177/09544062221126643.

12. Faur, A.S. *Research on the influence of a new tap drill geometry on C45, 42CrMo4 and X5CrNi8 steel processing* / A.S. Faur, M.S. Popa, B.C. Luca et al. // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 178. – 01002. DOI: 10.1051/mateconf/201817801002.

13. He, Q. *Research and Optimization of Process Parameters for Internal Thread Forming Based on Numerical Simulation and Experimental Analysis* / Q. He, Y. Jiang, X. Jing // *Materials*. – 2022. – Vol. 15. – 3160. DOI: 10.3390/ma15093160.

14. Hou, H-L. *Numerical Simulation and Process Optimization of Internal Thread Cold Extrusion Process* / H-L. Hou, G-P. Zhang, C. Xin et al. // *Materials*. – 2020. – Vol.13. – 3960. DOI: 10.3390/ma13183960.

15. Oezkaya, E. *An intuitive software system for the modelling of three-dimensional FEM tapping simulations* / E. Oezkaya, T. Haus, D. Biermann // *World Journal of Engineering Research and Technology*. – 2019. – Vol. 5. – Iss. 3. – P. 429–454.

16. Polvorosa, R. *Cutting edge control by monitoring the tapping torque of new and resharpened tapping tools in Inconel 718* / R. Polvorosa, L.N. López de Lacalle1, A.J. Sánchez Egea et al. // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2020. – Vol. 106. – P. 3799–3808. DOI: 10.1007/s00170-019-04914.

17. Wu, M-C. *Optimization of Tool Geometric Parameters For a Small Fluteless Forming Tap (FFT)* / M-C. Wu, W-R. Jian, L-S- Hsu et al. // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2022. – Vol. 120. – P. 3437–3449. DOI: 10.1007/s00170-022-08955-1.

18. Tang, Y.L. *CAD simulation study on the principle of tapping with modified-tooth tap* / Y.L. Tang, R. Hang, H. Wang // *WASE International Conference on Information Engineering*. – 2010. – P. 224–228. DOI: 10.1109/ICIE.2010.231.

19. Ren, J. *Mathematical model for tapping simulation to predict Radial Pitch Diameter Dierence of threads* / J. Ren, X. Yan // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2021. – Under review. DOI: 10.21203/rs.3.rs-192937/v1.

20. Shchurov, I.A. *Improved Axis Determination Method for Calculation of Virtual Pitch Thread Diameter Using a Point Cloud from CMM* / I.A. Shchurov // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – 2019. – P. 1621–1629. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_173.

Щуров Игорь Алексеевич, доктор технических наук, первый заместитель директора Политехнического института, профессор, кафедра «Технология автоматизированного машиностроения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, shchurovia@susu.ru.

Болдырев Игорь Станиславович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Технология автоматизированного машиностроения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, boldirevis@susu.ru.

Поступила в редакцию 28 октября 2022 г.

FE-MODELING OF TAPPING FOR CALCULATING THE VIRTUAL PITCH THREAD DIAMETER

I.A. Shchurov, shchurovia@susu.ru

I.S. Boldyrev, boldirevis@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The development of high-precision tapping operations involves predicting such accuracy. Very often, this requires expensive experiments. Numerical calculation methods, which have recently received wide application, make it possible to replace these experiments with computer simulations. However, this modeling is now mainly associated with determining the stresses and strength of tools, for which only the cutting tool itself and a fragment of the workpiece are modeled. This approach turns out to be unacceptable for predicting the machining accuracy, since the errors in the thread size and shape significantly depend on the actual movement of the tool, which, in turn, depends on the conditions of its fixing in the machine spindle. In this regard, the task concerns with not only the specified above technological system elements, but also an clamping tool. In addition, after calculating the thread surface of the part, it is necessary to calculate accuracy characteristics of this thread. It is these issues that are considered in this article: the results of finite element modeling of threading with a tap fixed in a tapping chuck of a floating-oscillating type are shown. The obtained graphs of axial force and torque correspond to the expected curves, both in its shape and in numerical values. The obtained thread point cloud made it possible to further calculate its virtual pitch thread diameter, which turned out to be comparable with the corresponding tap diameter and the same thread size from the state standard. Thus, the above calculations show their realism and the possibility of application in the practice of designing thread-cutting operations.

Keywords: tapping, thread quality, virtual pitch thread diameter, finite element method, threading simulation.

References

1. Fromentin G., Poulachon G. Modeling of interferences during thread milling operations. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2010. vol. 49. pp. 41–51. DOI: 10.1007/s00170-009-2372-5.
2. Lee W.S., Nestler A. Simulation-aided design of thread milling cutter. *Procedia CIRP.* 2012. vol. 1. pp. 120–125. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.019.
3. Wan M., Altintas Y. Mechanics and dynamic of thread milling process. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2014. vol. 87. pp. 16–26. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2014.07.006.
4. Khoshdarregi M.R., Altintas Y. Generalized modeling of chip geometry and cutting forces in multi-point thread turning. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2015. vol. 98. pp. 21–32. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.08.005.
5. Jun M.B.G., Araujo A.C. Modeling of the thread milling operation in a combined thread/drilling operation: thrilling. *Trans. ASME J. Manuf. Sci. Eng.* 2010. vol. 132. no. 014505. DOI: 10.1115/1.4000944.
6. Araujo A.C., Fromentin G., Poulachon G. Analytical and experimental investigations on thread milling forces in titanium alloy. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2013. vol. 67. pp. 28–34. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.12.005.
7. Armarego E., Chen M.N. Predictive Cutting Models for the Forces and Torque in Machine Tapping with Straight Flute Taps. *CIRP Annals – Manufacturing Technology.* 2002. vol. 51. no. 1. pp. 75–78. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61469-3.
8. Matveev V.V. *Narezanie tochnyh rez'b* [Precise threading] Moscow. Mashinostroenie. 1978. 88 p.
9. Shchurov I.A. *Raschet tochnosti obrabotki i parametrov instrumentov na osnove diskretnogo tverdotel'nogo modelirovaniya: monografiya* [Calculation of machining accuracy and tool parameters based on discrete solid modeling: monograph] Chelyabinsk: Publ. SUSU. 2004. 320 p.

10. Czarnecki H., Tubielewicz K., Zaborski A. et al. FEM simulation of material strain in corner of forming tap during cold thread shaping. *Tribologia*. 2019. vol. 288. pp. 5–16. DOI: 10.5604/01.3001.0013.7759.
11. Demirel T., Yagmur S., Kayir Y., Kurt A. Finite element simulation of stresses in cutting tools during tapping. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2022. DOI: 10.1177/09544062221126643.
12. Faur A.S., Popa M.S., Luca B.C. et al. Research on the influence of a new tap drill geometry on C45, 42CrMo4 and X5CrNi8 steel processing. *MATEC Web of Conferences*. 2018. vol. 178. 01002. DOI: 10.1051/mateconf/201817801002.
13. He Q., Jiang Y., Jing X. Research and Optimization of Process Parameters for Internal Thread Forming Based on Numerical Simulation and Experimental Analysis. *Materials*. 2022. vol. 15. no. 3160. DOI: 10.3390/ma15093160.
14. Hou H-L., Zhang G-P., Xin C. et al. Numerical Simulation and Process Optimization of Internal Thread Cold Extrusion Process. *Materials*. 2020. vol. 13. no. 3960. DOI: 10.3390/ma13183960.
15. Oezkaya E., Haus T., Biermann D. An intuitive software system for the modelling of three-dimensional FEM tapping simulations. *World Journal of Engineering Research and Technology*. 2019. vol. 5. iss. 3. pp. 429–454.
16. Polvorosa R., López de Lacalle L.N., Sánchez Egea A.J. et al. Cutting edge control by monitoring the tapping torque of new and resharpened tapping tools in Inconel 718. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2020. vol. 106. pp. 3799–3808. DOI: 10.1007/s00170-019-04914.
17. Wu M-C., Jian W-R., Hsu L-S, et al. Optimization of Tool Geometric Parameters For a Small Fluteless Forming Tap (FFT). *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2022. vol. 120. pp. 3437–3449. DOI: 10.1007/s00170-022-08955-1.
18. Tang Y.L., Hang R., Wang H. CAD simulation study on the principle of tapping with modified-tooth tap. *WASE International Conference on Information Engineering*. 2010. pp. 224–228. DOI: 10.1109/ICIE.2010.231.
19. Ren J., Yan X. Mathematical model for tapping simulation to predict Radial Pitch Diameter Difference of threads. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2021. Under review. DOI: 10.21203/rs.3.rs-192937/v1.
20. Shchurov I.A. Improved Axis Determination Method for Calculation of Virtual Pitch Thread Diameter Using a Point Cloud from CMM. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2019. pp. 1621–1629. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_173.

Received 28 October 2022

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Щуров, И.А. Конечно-элементное моделирование нарезания резьбы метчиком с целью прогнозирования ее приведенного среднего диаметра / И.А. Щуров, И.С. Болдырев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 73–80. DOI: 10.14529/engin230107

FOR CITATION

Shchurov I.A., Boldyrev I.S. FE-modeling of tapping for calculating the virtual pitch thread diameter. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2023, vol. 23, no. 1, pp. 73–80. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin230107
