

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/article\_5d4d674f73d7a2.60224643

<sup>1,\*</sup>Никитина И.П., <sup>1</sup>Поляков А.Н.<sup>1</sup>Оренбургский государственный университет  
Россия, 430005, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13

\*E-mail: innanikitina@list.ru

## СПЕЦИАЛЬНЫЙ МЕТЧИК ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ ВНУТРЕННИХ МЕЛКОРАЗМЕРНЫХ РЕЗЬБ

**Аннотация.** В работе представлена оригинальная конструкция специального метчика для нарезания точных резьб. Отличительными конструктивными особенностями метчика являются: наличие задней резьбовой направляющей, которая совместно с копирной резьбовой втулкой приспособления воспринимает осевые силы и обеспечивает метчику осевую подачу строго соответствующую шагу нарезаемой резьбы, исключая ее разбивание под действием осевых сил; наличие гладкой передней направляющей частью с направлением по нарезаемому отверстию, для уменьшения влияния радиальных сил, приводящих к разбиванию резьбы из-за радиальных колебаний метчика; наличие заборной части, реализующей наиболее технологичную генераторную схему резания. Представлен прототип специального метчика, изготовленный на токарно-фрезерном станке, подтверждающий технологичность предлагаемой конструкции инструмента. Проведенные в САЕ-системе Ansys исследования в области инженерного анализа показали существенное увеличение жесткости конструкции, а также существенное увеличение собственных частот. Тепловые расчеты показали возможные риски в обеспечении точности нарезания точной резьбы.

**Ключевые слова:** резьбонарезной инструмент, нарезание резьб, метчик, САД-система, САЕ-система.

**Введение.** Обработка резьбовых поверхностей в настоящее время реализуется различными способами. Например, наружные резьбы формируют резцом, гребенкой, резьбонарезной головкой, резьбовыми гребенчатыми фрезами, накатыванием плоскими или круглыми плашками [1]. Сегодня традиционные способы нарезания резьбы вытесняются наиболее производительными и надежными [1–6].

Обработка внутренних резьб небольших размеров выполняется метчиками [2]. Например, согласно ГОСТ 1336-77, минимальный диаметр резьбовой гребенчатой фрезы составляет 10 мм. Согласно этому ГОСТу нарезать резьбу большого диаметра с самым мелким шагом тоже невозможно. Вместе с тем машинные метчики являются одним из наименее надежных инструментов для нарезания резьбы. Поэтому исследованиям возникающих при резании усилий и крутящих моментов при нарезании резьбы не только фрезами и резцами, но метчиками уделяется большое внимание [5–9].

Длительные производственные наблюдения показывают, что несмотря на кажущуюся простоту процессов резьбонарезания, получить ожидаемый эффект при обработке точных резьб удается не всегда [10]. Иногда после обработки на высокопроизводительном автоматизированном

станке производится «ручная» калибровка резьбы, так как без этого не удастся выполнить точное и качественное резьбовое отверстие, или очень часты поломки метчиков при однопроходном резьбонарезании. Нарезание точных резьб при работе на обычном оборудовании осуществляется в основном комплектом метчиков, причем последний чистовой проход обычно выполняется вручную.

Факторами, снижающими работоспособность метчиков, в основном являются: выкрашивание режущих кромок на заборном конусе метчика; поломки метчиков (в особенности размером до 18 мм); невыполнение размеров и технических требований, предъявляемых к резьбе в деталях [3, 9, 10].

Основными причинами неточности параметров нарезаемой резьбы являются осевые и радиальные силы, воздействующие на метчик [5–13]. Поэтому для повышения точности необходимо уменьшать разбивание резьбы прежде всего от воздействия осевых сил, а затем - радиальных.

Ориентировочно для разных резьб могут быть названы величины разбиваний, приведенных в табл. 1.

Если сравнить эти зоны разброса с полями допусков на резьбу, то точность резьбы колеб-

лется приблизительно от второй до девятой степени точности. Этим и обусловлено примечание к рекомендациям по назначению класса метчиков в зависимости от полей допусков нарезаемых метрических резьб по ГОСТ 16925-93 (табл. 2).

Таблица 1

**Величины разбиваний резьб**

Метчики	Разбивание, мм
M6-M12	0,04–0,16
M14-M22	0,05–0,24
M24-M36	0,05–0,4

Таблица 2

**Назначение класса точности метчика в зависимости от полей допусков нарезаемых метрических резьб**

Класс точности метчика	Поле допуска нарезаемой резьбы
1	4H, 5H
2	6H, 4G, 5G
3	7H, 8H, 6G
4	7H, 8H

Анализ конструктивных особенностей стандартных и специальных метчиков, а также рекомендации, представленные в научной и справочной литературе, определили конструкцию специального машинно-ручного метчика для однопроходного нарезания точной сквозной метрической резьбы. Конструкцию метчика отличает:

- наличие задней резьбовой направляющей, которая совместно с копирной резьбовой втулкой приспособления воспринимает осевые силы и обеспечивает метчику осевую подачу строго соответствующую шагу нарезаемой резьбы, исключая ее разбивание под действием осевых сил;

- наличие гладкой передней направляющей частью с направлением по нарезаемому отверстию, для уменьшения влияния радиальных сил, приводящих к разбиванию резьбы из-за радиальных колебаний метчика, при этом радиальные колебания метчика должны остаться в пределах зазора между направляющими поверхностями;

- наличие заборной части, реализующей стандартную генераторную схему резания, как наиболее технологичную.

При этом следует отметить, что:

- приведенные в табл. 2 поля допусков нарезаемых резьб могут быть получены метчиками только при эксплуатации их на станках, соответствующего класса точности и с применением патронов, обеспечивающих центрирование метчиков в отверстии;

- точность нарезания резьбы зависит от обрабатываемого материала, скорости резания и свойств смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), что может привести несколько к иным сочетаниям класса точности метчика и полей допусков нарезаемых метрических резьб, приведенных в табл. 2.

Направляющие части метчика проектируются за одно целое с рабочей частью метчика, т.к. это гарантирует их наиболее точное расположение. Инструментальный материал – быстрорежущая сталь P6M5 ГОСТ 19256-73, материал хвостовика сталь 40X ГОСТ 4543-71.

**Методика.** Расчет геометрических параметров метчика производился по методике, предложенной Шагуном В.И. [14]. Определение основных размеров нарезаемой резьбы наружного, внутреннего и среднего диаметров и шага производится по ГОСТ 9150-81. Технические требования приняты по ГОСТ 3449-84 для метчика первого класса точности.

Проектирование станочного установочного приспособления для нарезания сквозной резьбы специальным машинно-ручным метчиком M16x2-1кл. производилось для детали типа «Втулка» M16x2-4H, по конструкции соответствующей микрометрической втулке с внутренней резьбой мерительного инструмента.

При конструировании метчика использовались САД-система КОМПАС 3D и САЕ-система Ansys. С использованием САЕ-системы Ansys были выполнены расчеты статических и модальных характеристик двух конструктивных вариантов метчиков: стандартного и специального с двумя направляющими частями.

**Основная часть.** Рабочий чертеж метчика и его прототип [15], изготовленный на станке HAAS ST-10Y, представлены на рис. 1 и 2.

На рис. 3 представлено спроектированное приспособление для закрепления детали с направляющими втулками для метчика специальной конструкции.

Для проведения последующих исследований была разработана трехмерная модель метчика (рис. 4 а).

Результаты статических и модальных характеристик в САЕ-системе Ansys позволили внести уточнение в геометрические параметры проектируемого метчика.

При выполнении расчетов использовались два вида расчетных моделей: трехмерная твердотельная и одномерная стержневая. Твердотельная модель была построена с использованием типовых конечных элементов Solid185 (рис. 4 б), а одномерная – с использованием стержневых элементов Beam188.

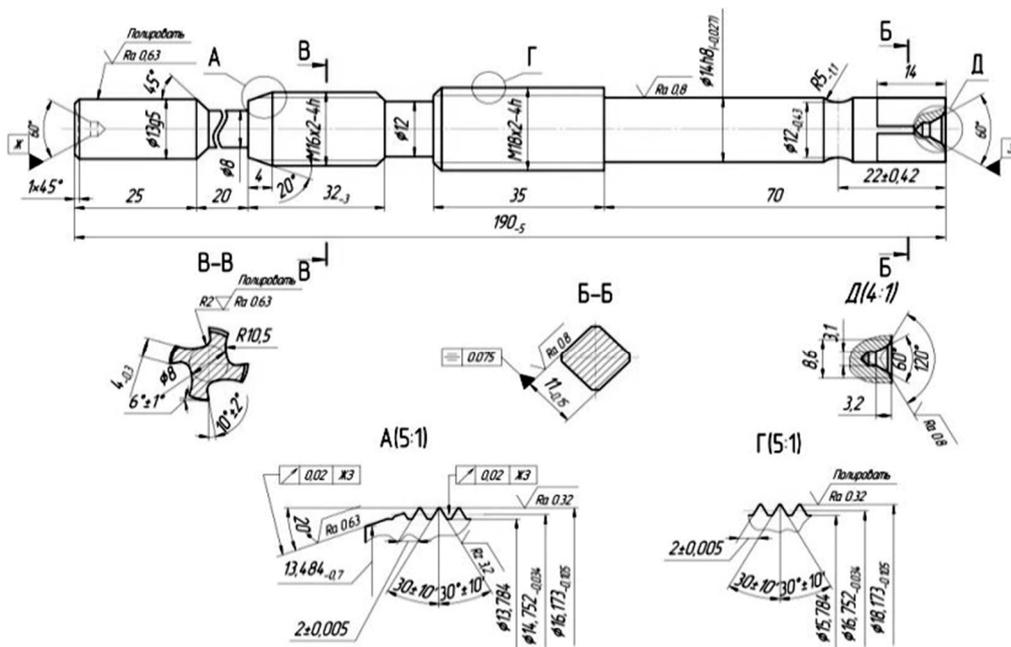
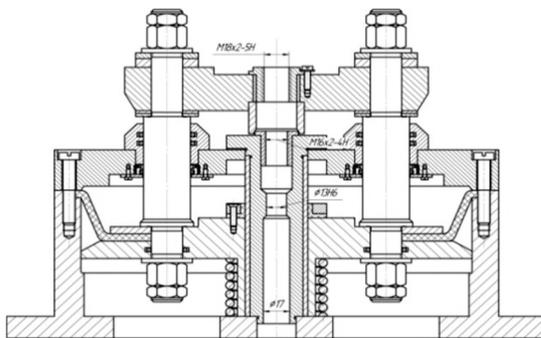


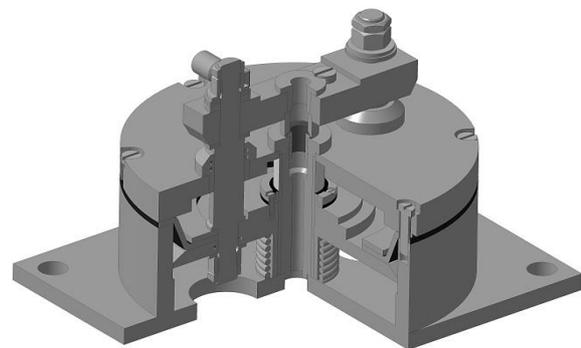
Рис. 1. Рабочий чертеж метчика



Рис. 2. Прототип метчика



а) 2D-чертеж

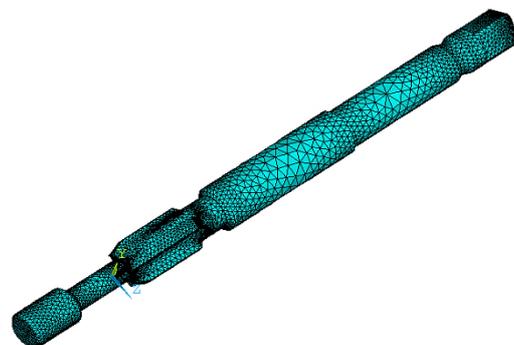


б) 3D-модель

Рис. 3. Приспособление для закрепления детали с направляющими втулками для метчика



а)



б)

Рис. 4. Трехмерная (а) и сеточная (б) модель метчика с использованием твердотельных элементов Solid 185

Достоинством стержневой модели является возможность наиболее точного воспроизведения геометрии инструмента в расчетной модели. Недостатком – сложность задания нагрузки, т.к. в этом случае сильно сказывается кромочный эффект, приводящий к искажению результатов решения статической задачи.

Несмотря на то, что стержневая модель имеет очевидные ограничения по точности представления геометрии метчика, для неё проще задать граничные условия: нагрузку и условия закрепления. Независимо от конструктивного исполнения метчиков, нагрузка от сил резания была

```
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =.551E-03
SMX =.551E-03
```

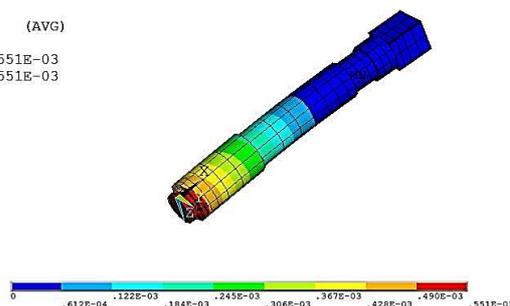


Рис. 5. Результаты статического расчета метчика стандартной конструкции

Для специального метчика максимальные перемещения не превысили 30 мкм (рис. 6). Если принять во внимание статические перемещения, вносимые несущей системой станка, а также перемещения, обусловленные контактной жесткостью соединения «метчик - шпиндель», то полученные расчетные значения очень хорошо согласовались с требуемыми параметрами точности.

На рис. 7 представлены результаты модального расчета для метчика специальной конструкции. Модальный расчет для метчика стандартной конструкции показал, что даже стандартная конструкция метчика обеспечивает его высокую виброустойчивость. Первая собственная частота составляет около 1500 Гц, а для специального метчика первая собственная частота составляет значение около 5000 Гц. Формы колебаний первых четырех мод приведены на рис. 7. Полученные результаты модального расчета позволили исключить необходимость выполнения динамического расчета, т.к. в настоящее время с такими скоростями резания метчики не работают. Хотя для реализации прорывных технологий высокую виброустойчивость метчиков следует учитывать.

Несмотря на невысокие скорости резания для метчика актуальны тепловые деформации, так как они оказывают влияние на накопленную ошибку шага резьбы и диаметральные размеры нарезаемой резьбы. При резании метчик, как и любой инструмент для обработки отверстий, ра-

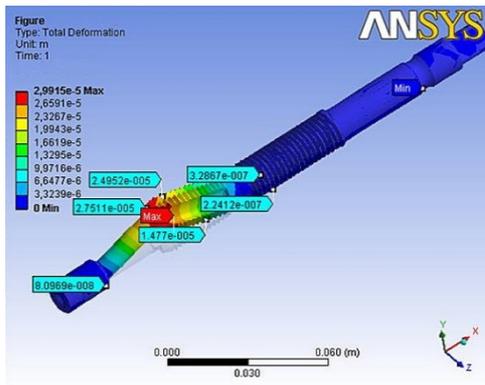
представлена одинаковыми составляющими: осевой и радиальной составляющими сил резания, а также крутящим моментом.

Наличие в специальном метчике направляющих частей позволили задать дополнительные ограничения по степеням свободы.

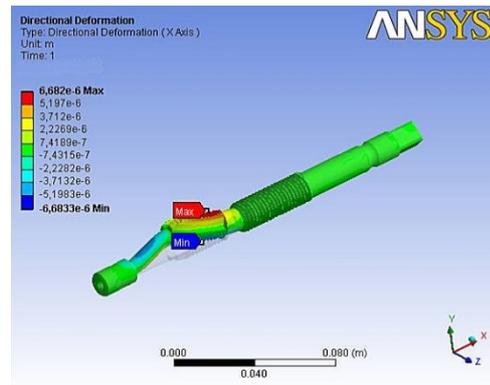
Анализ результатов статического расчета показал, что метчик стандартной конструкции под действием составляющих сил резания получает значительные перемещения, существенно превышающие требуемую величину – 34 мкм (рис. 5).

ботает в стесненных условиях с точки зрения тепловых процессов. Процессы трения в зоне резания вызывают генерацию тепла. Расчетная модель представлена на рис. 8 а, распределение температуры – на рис. 8 б.

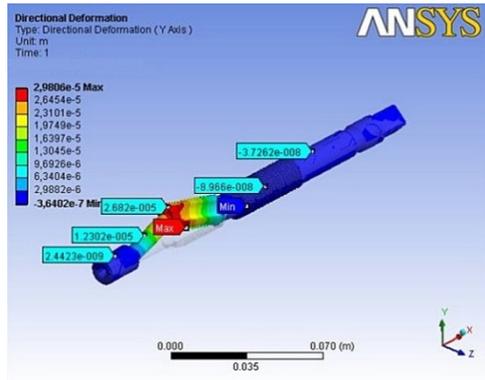
Для области конвективного теплообмена (область А) принят коэффициент теплоотдачи равный 80 Вт/(м<sup>2</sup>·К) из расчета коэффициентов теплоотдачи для вращающихся труб, подверженных принудительному охлаждению (в качестве принудительного охлаждения используется смазочно-охлаждающая жидкость). Величина мощности теплового источника определялась из условия, что до 10 % от мощности резания уходит в инструмент. Полученный результат стационарного теплового расчета показал, что максимальная температура составила около 150 °С (рис. 8 б). Решение связанной задачи термоупругости позволило построить поле суммарных температурных деформаций (рис. 9 а), так и по каждой из координатных осей (рис. 9 б, в, г). Анализ полученных результатов показал, что тепловые деформации приводят к искажению диаметральных размеров обрабатываемого отверстия в пределах 27 мкм, а в осевом направлении возможно удлинение рабочей части до 60 мкм. При этом наиболее критичными являются осевые деформации, так как их величина в зависимости от класса точности метчика составляет от 20 до 90 мкм для рассматриваемых параметров резьбы инструмента.



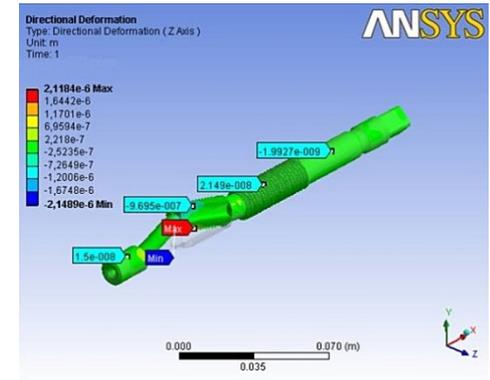
а) суммарные перемещения



б) перемещения вдоль оси X

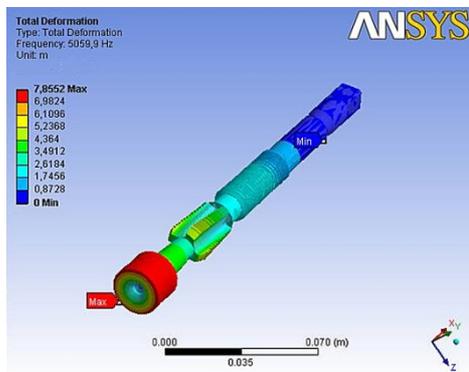


в) перемещения вдоль оси Y

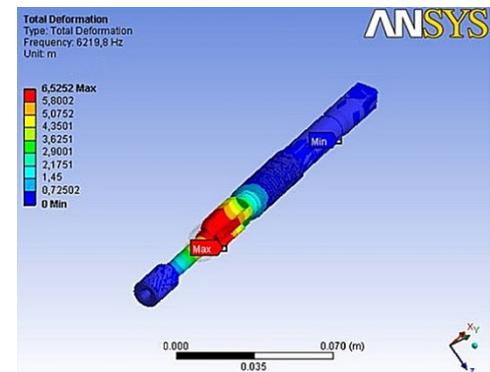


г) перемещения вдоль оси Z

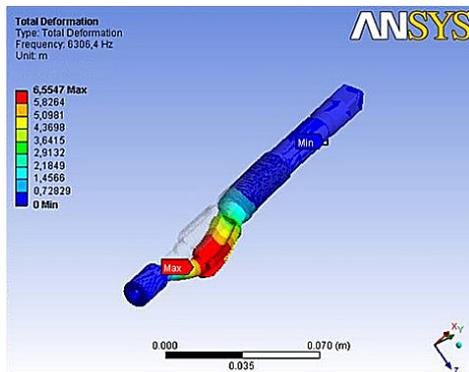
Рис. 6. Результаты статического расчета специального метчика



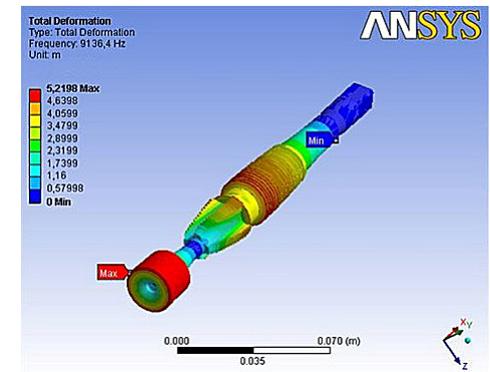
а) первая мода



б) вторая мода



в) третья мода



г) четвертая мода

Рис. 7. Результаты модального расчета специального метчика

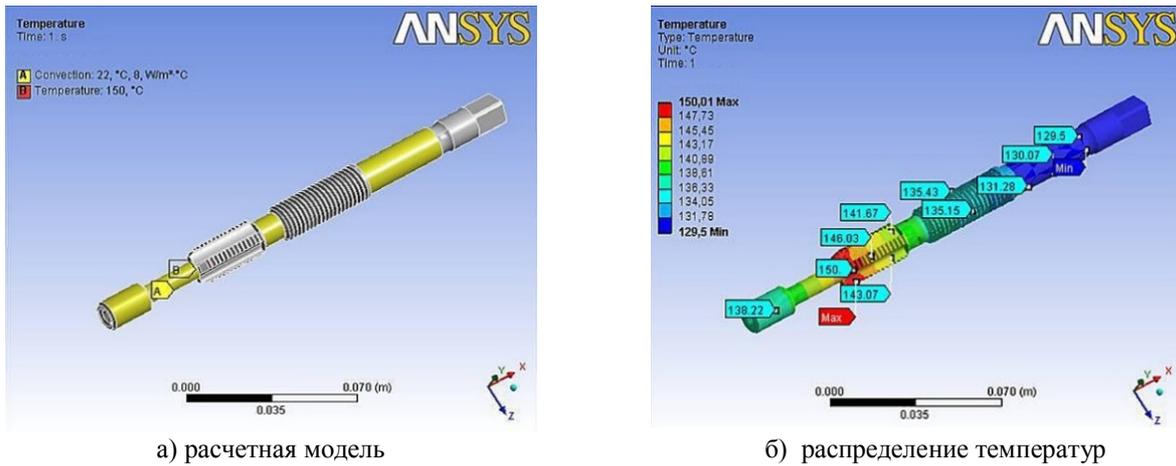


Рис. 8. Результат теплового анализа специального метчика

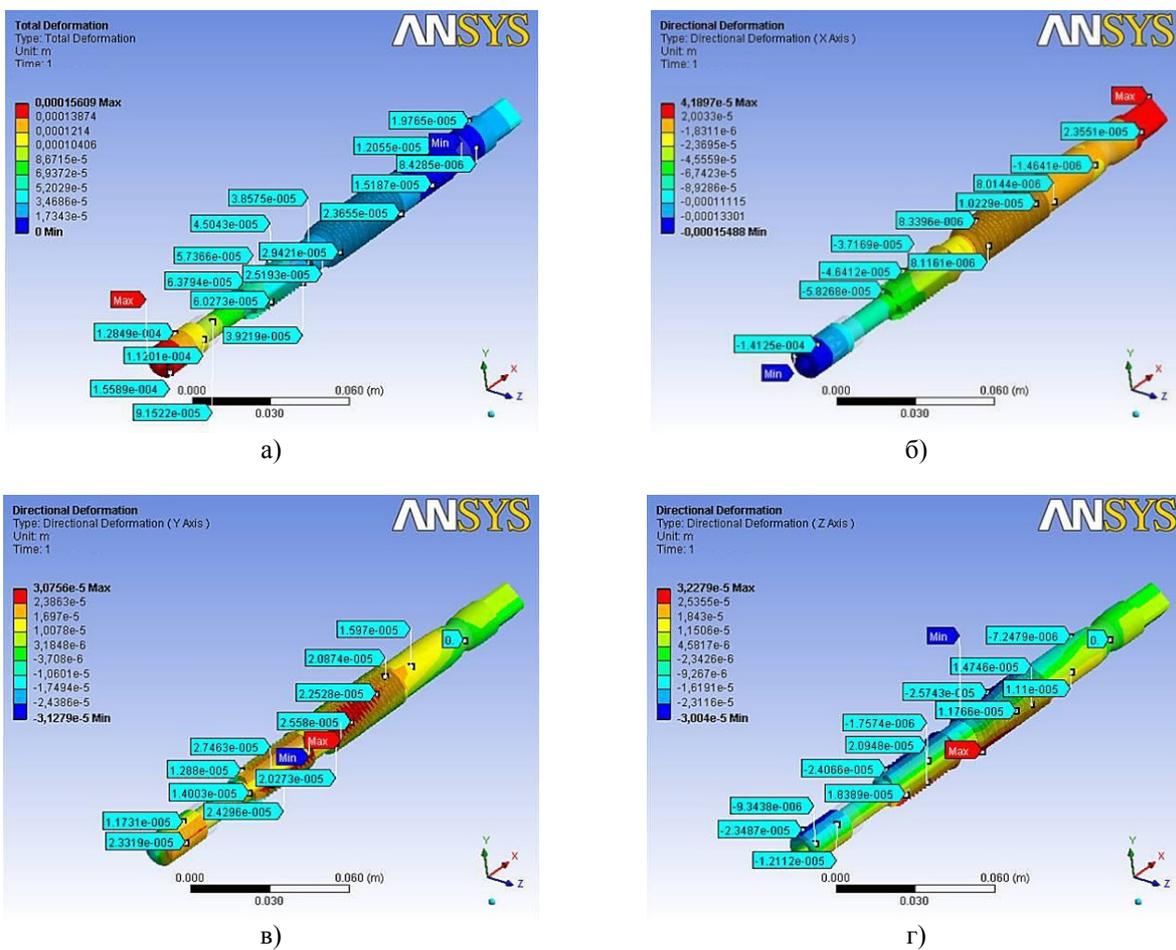


Рис. 9. Результат термодформационного анализа специального метчика

**Выводы.** Представлена оригинальная конструкция специального метчика для нарезания точных резьб. Изготовленный прототип на токарно-фрезерном станке показал технологичность конструкции. Проведенные в CAE-системе Ansys исследования показали существенное увеличение жесткости конструкции, а существенное увеличение собственных частот показывает новое направление исследовательских работ в обла-

сти нарезания резьб специальным метчиком. Расчет тепловых деформаций показал возможные риски в обеспечении точности нарезания резьбы метчиками первого, второго и третьего класса точности, так как для этих метчиков предельные отклонения шага резьбы не должны превышать  $\pm 10$  мкм.

**Источник финансирования.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (Российский фонд фундаментальных исследований) и Оренбургской области в рамках научного проекта № 19-48-560001.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Zhang D.W., Zhao S.D., Wu S.B., Zhang Q., Fan S.Q., Li J. Phase characteristic between dies before rolling for thread and spline synchronous rolling process // *Int J Adv Manuf Technol.* 2015. Vol. 81. № 1-4. Pp. 513–528.
- dos Santos Siqueira B., Freitas S.A., Pereira R.B.D., Lauro C.H., Brandão L.C. Influence of chip breaker and helix angle on cutting efforts in the internal threading process // *Int J Adv Manuf Technol.* 2019. Pp. 1–10.
- Sales W.F., Becker M., Gurgel A.G., Júnior J.L. Dynamic behavior analysis of drill-threading process when machining AISI Al-Si-Cu4 alloy // *Int J Adv Manuf Technol.* 2009. Vol. 42. № 9-10. Pp. 873–882.
- Kirichek A.V., Afonin A.N. Stress–Strain State of the Thread-Milling Tool and Blank // *Russian Engineering Research.* 2007. vol. 27. № 10. Pp. 715–718.
- Akyildiz H.K. Evaluating of cutting forces in thread machining // *Int J Adv Manuf Technol.* 2013. Vol. 68. № 5-8. Pp. 1601–1612.
- Akyildiz H.K., Livatyali H. Effect of cutting energy on fatigue behavior of threaded specimens // *Int J Adv Manuf Technol.* 2014. Vol. 70. № 1-4. Pp. 547–557.
- Сирицын А.И., Широких Э.В. Получение мелких резьбовых отверстий в труднообрабатываемых сплавах // *Техника и технологии, политика и экономика: проблемы и перспективы: сб. материалов конф. IV Междунар. науч.-практ. конф. / Коломенский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет» (Коломна, 30 апреля 2017 г.), Коломна: Изд-во Коломенский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», 2017. С. 33–43.*
- Pereira I.C., Da Silva M.B., Da Cunha D.F., Sales C.W. Analysis of tapping process in three types of cast iron // *Int J Adv Manuf Technol.* 2016. Vol. 82. № 5–8. Pp. 1041–1048.
- Pereira I.C., da Silva M.B. Study of the internal thread process with cut and form taps according to secondary characteristics of the process // *Int J Adv Manuf Technol.* 2017. Vol. 93. № 5–8. Pp. 2357–2368.
- Gil Del Val A., Fernández J., del Castillo E., Arizmendi M., Veiga F. Monitoring of thread quality when tapping nodular cast iron with TiN-coated HSS cutting taps // *Int J Adv Manuf Technol.* 2013. Vol. 69. Pp. 1273–1282.
- Oezkaya E., Biermann D. Development of a geometrical torque prediction method (GTPM) to automatically determine the relative torque for different tapping tools and diameters // *Int J Adv Manuf Technol.* 2018. Vol. 97. Pp. 1465–1479.
- Wang L., Chen Z.C. A new CAD/CAM/CAE integration approach to predicting tool deflection of end mills // *Int J Adv Manuf Technol.* 2014. Vol. 72. No. 9-12. Pp. 1677–1686.
- Кургузов С.А. Влияние переднего угла и угла подъема режущей кромки рабочей части метчика на момент резания / Концепции устойчивого развития науки в современных условиях: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. // Казань, 14 декабря 2017 г., Уфа: Изд-во ООО «Агентство международных исследований», 2017. С. 109–111.
- Шагун В.И. *Металлорежущие инструменты.* М.: Высш. шк., 2007. 423 с.
- Салтыков Р.А. Повышение точности и производительности обработки деталей машин за счет использования комбинированного инструмента // *Студенческие научные общества - экономике регионов: сб. материалов конф. Междунар. молодежной науч. конф. / Оренбургский государственный университет (Оренбург, 31 октября – 02 ноября 2018 г.), Оренбург: Изд-во ОГУ, 2018. С. 409–412.*

#### Информация об авторах

**Никитина Инна Петровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: [innanikitina@list.ru](mailto:innanikitina@list.ru). Оренбургский государственный университет, Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

**Поляков Александр Николаевич**, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов, профессор. E-mail: [anp\\_temos@mail.ru](mailto:anp_temos@mail.ru). Оренбургский государственный университет, Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13

Поступила в июне 2019 г.

© Никитина И.П., Поляков А.Н., 2019

<sup>1,\*</sup>*Nikitina I.P.*, <sup>1</sup>*Polyakov A.N.*  
<sup>1</sup>*Orenburg State University*  
*Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13*  
*\*E-mail: innanikitina@list.ru*

## SPECIAL TAP FOR CUTTING INTERNAL SMALL-SIZED THREADS

**Abstract.** *The paper presents the original design of a special tap for cutting precise threads. Distinctive design features of the tap are: the presence of the rear threaded guide that together with the copier threaded sleeve device perceives the axial forces and provides the tap axial feed strictly corresponding to the step of the thread being cut, excluding its breaking under the action of axial forces; the presence of a smooth front guide part with the direction on the cut hole, to reduce the influence of radial forces leading to the breakdown of the thread due to radial vibrations of the tap; the presence of the chamfer that implements the most technological cutting scheme such as flank infeed. A prototype of a special tap made on a turning and milling machine tool is presented, confirming the manufacturability of the proposed tool design. Research conducted in the field of engineering analysis with the CAE system Ansys shows a significant increase in structural rigidity and in natural frequencies.*

**Keywords:** *thread-cutting tool, threading, tap, CAD system, CAE system.*

### REFERENCES

- Zhang D.W., Zhao S.D., Wu S.B., Zhang Q., Fan S.Q., Li J. Phase characteristic between dies before rolling for thread and spline synchronous rolling process. *Int J Adv Manuf Technol.* 2015. Vol. 81. No. 1-4. Pp. 513–528.
- dos Santos Siqueira B., Freitas S.A., Pereira R.B.D., Lauro C.H., Brandão L.C. Influence of chip breaker and helix angle on cutting efforts in the internal threading process. *Int J Adv Manuf Technol.* 2019. Pp. 1–10.
- Sales W.F., Becker M., Gurgel A.G., Júnior J.L. Dynamic behavior analysis of drill-threading process when machining AISI Al-Si-Cu4 alloy. *Int J Adv Manuf Technol.* 2009. Vol. 42. No. 9-10. Pp. 873–882.
- Kirichek A.V., Afonin A.N. Stress–Strain State of the Thread-Milling Tool and Blank. *Russian Engineering Research.* 2007. Vol. 27. No. 10. Pp. 715–718.
- Akyildiz H.K. Evaluating of cutting forces in thread machining. *Int J Adv Manuf Technol.* 2013. Vol. 68. No. 5-8. Pp. 1601–1612.
- Akyildiz H.K., Livatyali H. Effect of cutting energy on fatigue behavior of threaded specimens. *Int J Adv Manuf Technol.* 2014. Vol. 70. No. 1-4. Pp. 547–557.
- Siricyn A.I., SHirokih E.V. Getting small threaded holes in hard-to-machine alloys [Poluchenie melkih rez'bovyh otverstij v trudnoobrabatyvaemyh splavah]. IV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya "Tekhnika i tekhnologii, politika i ekonomika: problemy i perspektivy". Kolomenskij institut (filial) FGBOU VO «Moskovskij politekhnicheskij universitet», 2017. Pp. 33–43. (rus)
- Pereira I.C., Da Silva M.B., Da Cunha D.F., Sales C.W. Analysis of tapping process in three types of cast iron. *Int J Adv Manuf Technol.* 2016. Vol. 82. No. 5–8. Pp. 1041–1048.
- Pereira I.C., da Silva M.B. Study of the internal thread process with cut and form taps according to secondary characteristics of the process. *Int J Adv Manuf Technol.* 2017. Vol. 93. No. 5–8. Pp. 2357–2368.
- Gil Del Val A., Fernández J., del Castillo E. et al., Monitoring of thread quality when tapping nodular cast iron with TiN-coated HSS cutting taps. *Int J Adv Manuf Technol.* 2013. Vol. 69. Pp. 1273–1282.
- Oezkaya E., Biermann D. Development of a geometrical torque prediction method (GTPM) to automatically determine the relative torque for different tapping tools and diameters. *Int J Adv Manuf Technol.* 2018. Vol. 97. Pp. 1465–1479.
- Wang L., Chen Z.C. A new CAD/CAM/CAE integration approach to predicting tool deflection of end mills. *Int J Adv Manuf Technol.* 2014. Vol. 72. No. 9-12. Pp. 1677–1686.
- Kurguzov S.A. Influence of the front angle and the angle of elevation of the cutting edge of the working part of the tap at the time of cutting [Vliyanie perednego ugla i ugla pod"ema rezhushchej kromki rabochej chasti metchika na moment rezaniya]. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya "Konceptii ustojchivogo razvitiya nauki v sovremennyh usloviyah". Kazan, 2017. Pp. 109–111. (rus)
- Shagun V.I. Metal cutting tools [Metallozhushchie instrumenty]. Moscow: Vysshaya shkola, 2007. 423 p. (rus)
- Saltykov R.A. Improving the accuracy and productivity of machining machine parts through the use of a combined tool [Povyshenie tochnosti i proizvoditel'nosti obrabotki detalej mashin za schet ispol'zovaniya kombinirovannogo instrumenta].

Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferenciya "Studentcheskie nauchnye obshchestva - ekonomike regionov". Orenburgskij gosudarstvennyj universitet, 2018. Pp. 409–412. (rus)

*Information about the authors*

**Nikitina, Inna P.** PhD, Assistant professor. E-mail: [innanikitina@list.ru](mailto:innanikitina@list.ru). Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

**Polyakov, Aleksandr N.** PhD, Professor. E-mail: [anp\\_temos@mail.ru](mailto:anp_temos@mail.ru). Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

---

*Received in June 2019*

**Для цитирования:**

Никитина И.П., Поляков А.Н. Специальный метчик для нарезания внутренних мелкогабаритных резьб // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 8. С. 106–114. DOI: 10.34031/article\_5d4d674f73d7a2.60224643

**For citation:**

Nikitina I.P., Polyakov A.N. Special tap for cutting internal small-sized threads. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 8. Pp. 106–114. DOI: 10.34031/article\_5d4d674f73d7a2.60224643