

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ХВОСТОВИКОМ *Capto*

© 2016

Л.А. Резников, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

А.Т. Касимов, студент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

И.О. Бочкарёва, ведущий инженер разработки ходовой части автомобиля

NISSAN Manufacturing Russia, Санкт-Петербург (Россия)

Ключевые слова: конус Морзе; соединение *Capto*; сверло; прочность.

Аннотация: В статье рассмотрен вопрос целесообразного применения инструмента с хвостовиком *Capto*, а также условия возникновения зазора в соединении «инструмент – инструментальный шпиндель» и зависимость этого зазора от погрешности изготовления отверстия в шпинделе станка.

Были проведены расчеты момента трения и крутящего момента при сверлении отверстий инструментом со стандартным хвостовиком Морзе и хвостовиком *Capto*. На основе этих расчетов было получено первое техническое ограничение – зависимость предельного значения подачи, обеспечивающего отсутствие проворачивания сверла в шпинделе станка, от диаметра инструмента. С учетом максимальных касательных напряжений в сверле было получено второе техническое ограничение – зависимость предельного значения подачи от диаметра сверла, основанная на требуемой прочности инструмента. Указанные технические ограничения были положены в основу определения областей целесообразного использования стандартных хвостовиков (в частности, конусов Морзе) и хвостовиков *Capto*.

С помощью аппарата аналитической геометрии была проанализирована геометрия соединения *Capto* и выявлены области появления максимального зазора в соединении. В первом приближении поперечное сечение соединения было представлено в виде треугольников со скругленными вершинами, а суммарная погрешность изготовления соединения была отнесена к углу при вершине отверстия в шпинделе. Это позволило математически обосновать область появления максимального зазора и получить зависимость максимального зазора от погрешности изготовления отверстия в шпинделе станка.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее распространенным является закрепление осевого режущего инструмента в шпинделе станка и придание ему крутящего момента с помощью гладких конических хвостовиков, как правило, выполненных в виде конусов Морзе. Основным недостатком гладкого конического соединения является весьма высокая вероятность проворачивания инструмента в шпинделе под действием сил резания.

Компанией *Sandvik* для повышения надежности закрепления осевого инструмента и эффективной передачи на него крутящего момента было предложено использовать хвостовики в виде так называемого конуса *Capto* [1].

Способ соединения хвостовика со шпинделем при применении конуса *Capto* основан на том, что две контактные поверхности – конус треугольного профиля (рис. 1), обеспечивающий самоцентрирование соединения, и фланец, ограничивающий осевое перемещение, – используются одновременно. Для повышения стабильности соединения используется посадка с натягом [2; 3]. Это позволяет отказаться от съемных элементов (штифтов, шпонок и т. п.) и снизить вероятность радиального и осевого смещения инструмента [4–6]. Эта вероятность, однако, возрастает при нарушении геометрии соединения вследствие погрешностей изготовления инструмента [7–10].

Сложная конфигурация соединения существенно удорожает инструмент с хвостовиком *Capto* по сравнению с инструментом, оснащенным стандартным хвостовиком Морзе.

В данной работе рассмотрены два вопроса: 1) как максимальный зазор в соединении *Capto* зависит от угловой погрешности изготовления отверстия в шпинделе станка и 2) каковы условия рационального применения инструментов с хвостовиком *Capto*.



Рис. 1. Конструкция и размеры конусов *Capto* [1]

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились аналитическим путем.

При точностных расчетах использовались положения аналитической геометрии на плоскости.

При определении областей рационального применения стандартных конусов Морзе и конусов *Capto* использовались силовые соотношения из теории резания материалов и эмпирические зависимости силовых факторов от элементов режима резания.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При исследовании зазора в соединении *Capto* была принята следующая схематизация соединения:

1. В первом приближении поперечное сечение соединения было представлено в виде треугольников со скругленными вершинами.

2. Суммарная погрешность изготовления соединения была отнесена к углу $2\delta > 60^\circ$ при вершине отверстия в шпинделе, а профиль хвостовика инструмента считали равнобедренным треугольником (рис. 2).

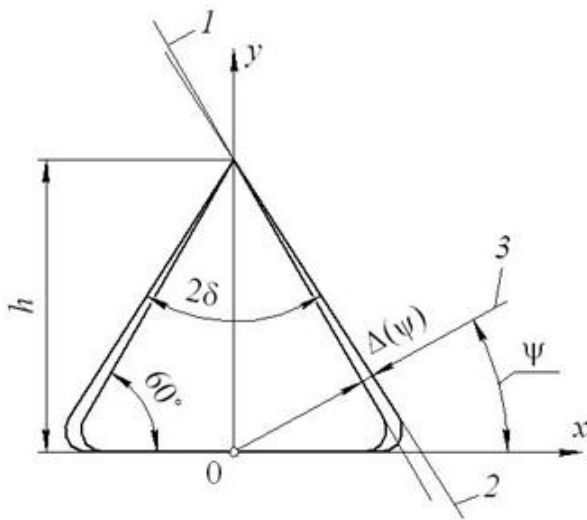


Рис. 2. К расчету максимального зазора в соединении

При такой схематизации уравнение боковой поверхности профиля хвостовика в системе координат xOy (рис. 2, прямая 1) имеет вид

$$y = -x\sqrt{3} + h, \quad (1)$$

а уравнение боковой поверхности профиля отверстия в шпинделе (рис. 2, прямая 2) имеет вид

$$y = -x \operatorname{ctg} \delta + h, \quad (2)$$

где h – теоретическая высота профиля.

Для нахождения текущего зазора в соединении проведем из начала координат луч 3 (см. рис. 2), который составляет с осью x некоторый угол $\psi \in [0; 90]$ и описывается зависимостью

$$y = x \operatorname{tg} \psi. \quad (3)$$

Расстояние между точками пересечения луча 3 с прямыми 1 и 2 будет являться текущим зазором $\Delta(\psi)$. Решая совместно (1), (2) и (3), получаем

$$\Delta(\psi) = \frac{h(\sqrt{3} - \operatorname{ctg} \delta) \sqrt{\operatorname{tg}^2 \psi + 1}}{(\operatorname{tg} \psi + \operatorname{ctg} \delta)(\operatorname{tg} \psi + \sqrt{3})}. \quad (4)$$

Максимальный зазор в соединении отвечает условию $d\Delta/d\psi = 0$. Взяв производную от (4), приравняв ее к нулю и отбросив посторонние корни, не отвечающие условию $\psi \in [0; 90]$, получаем, что при принятой схематизации соединения максимальный зазор в нем возникает при текущем угле

$$\psi_o = \operatorname{arctg} \sqrt{\sqrt{3} - 1}. \quad (5)$$

Подстановка (5) в (4) позволяет получить зависимость максимального зазора от суммарной погрешности изготовления угла 2δ :

$$\Delta_{\max}(\delta) = \frac{h^4 \sqrt{3}}{\sqrt{\sqrt{3} - 1} + \sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{3} - \operatorname{ctg} \delta}{\sqrt{\sqrt{3} - 1} + \operatorname{ctg} \delta}. \quad (6)$$

Расчет по формуле (6) показывает, что при суммарной погрешности изготовления угла 2δ в пределах $1^\circ (\pm 30')$ наибольший относительный зазор в соединении *Capto* составляет $\Delta_{\max}/h = 0,0135$.

К вопросу об области целесообразного применения хвостовиков *Capto* при работе осевого инструмента подойдем, основываясь на известном из теории резания положении, что проворачивание инструмента, оснащенного стандартными «гладкими» конусами в шпинделе станка происходит, если

$$M \geq M_{mp}, \quad (7)$$

то есть крутящий момент на инструменте в процессе резания превышает момент трения хвостовика инструмента в шпинделе станка [11; 12].

Неравенство (7) фактически представляет собой условие целесообразного применения конусов *Capto*. Конкретизируем величины, входящие в (7).

Момент трения (Н·м) на стандартном конусе со средним диаметром \bar{d} и конусностью ρ описывается соотношением

$$M_{mp} = 10^{-3} \xi (1 - 0,04\Delta) P_o \frac{\bar{d}}{\rho}, \quad (8)$$

где ξ – коэффициент трения скольжения (для трения стали по стали можно принять $\xi = 0,15$);

Δ – угловая погрешность изготовления конуса (для конусов Морзе среднее значение $\Delta = 20'$);

P_o – осевая сила, действующая на инструмент.

В [13–15] приведено выражение для осевой силы (в ньютонах) в виде

$$P_o = 10 C_p D^{q_p} s^{y_p} K_p, \quad (9)$$

где D – диаметр инструмента, мм; s – подача, мм/об. При сверлении значения коэффициентов и показателей

степени в выражении (9) составляют: $C_p=68$; $q_p=1$; $y_p=0,7$; $K_p=1$.

С учетом (9) и приведенных выше значений ξ , Δ , C_p , q_p , y_p и K_p выражение (8) принимает вид

$$M_{np} = 0,02Ds^{0,7} \frac{\bar{d}}{\rho}. \quad (10)$$

Крутящий момент (Н·м) при сверлении

$$M = 10C_M D^{q_M} s^{y_M} K_p, \quad (11)$$

где $C_M=0,0345$;

$q_M=2$; $y_M=0,8$;

$K_p=1$ [13–15].

Подставляя (10) и (11) в (7), имеем

$$s^{0,1} \geq \frac{0,058}{D} \frac{\bar{d}}{\rho}. \quad (12)$$

Из выражения (12) может быть найдено минимальное значение подачи на один оборот сверла диаметром D , при котором имеет смысл оснащать инструмент и шпиндель станка конусами *Capto*. (Напомним, что это же значение подачи будет максимально допустимым при работе инструментом с «гладким» коническим хвостовиком.) Зависимость $s(D)$ для конуса Морзе 4 ($\bar{d}/\rho = 547$) показана на рис. 3. Ниже кривой $s(D)$ – зона целесообразного использования конуса Морзе 4, а выше – зона целесообразного использования конуса *Capto*.

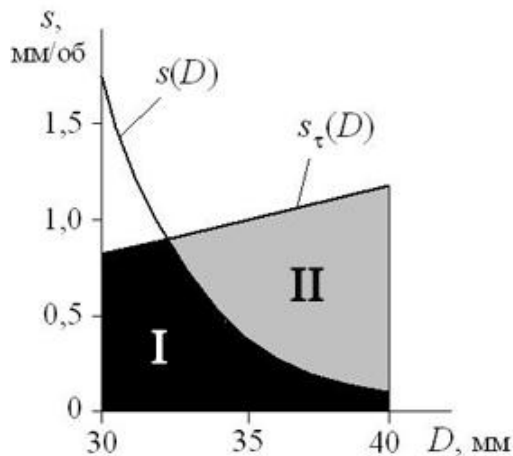


Рис. 3. Зоны целесообразного использования хвостовиков в виде конусов Морзе 4 (I) и *Capto* (II)

Однако применение конуса *Capto* не означает, что сверло с таким хвостовиком может работать с любой подачей свыше минимальной, рассчитанной по формуле (12). При больших подачах и, как следствие, больших крутящих моментах ограничение на значение подачи накладывает прочность инструмента [16; 17].

Сверла рассчитывают на кручение [18–20]. Из курса сопротивления материалов известно, что в круглом

стержне диаметром D (мм), на который действует крутящий момент M (Н·м), возникают наибольшие касательные напряжения (МПа):

$$\tau_{\max} = \frac{16 \cdot 10^3 M}{\pi D^3}. \quad (13)$$

Из-за стружечных канавок сечение сверла меньше сечения сплошного круглого стержня, поэтому, как показывает анализ, наибольшие касательные напряжения в сверле $\tau_{\max}^{ce} \approx 5\tau_{\max}$.

Записывая ограничение по прочности сверла в виде $\tau_{\max}^{ce} \leq [\tau]$, где $[\tau] \approx 250$ МПа – допускаемое напряжение кручения, с учетом (11) и (13) получаем

$$s_{\tau} \leq 0,0117D^{1,25}. \quad (14)$$

Неравенство (14), определяющее область подач, допускаемых прочностью сверла, на рис. 3 описывается зоной ниже кривой $s_{\tau}(D)$.

Таким образом, на рис. 3 (и аналогичных ему, построенных для других разновидностей «гладких» инструментальных конусов) можно отметить зону целесообразного использования стандартных конусов (выделена черным цветом и обозначена римской цифрой I) и зону целесообразного использования конусов *Capto* (выделена серым цветом и обозначена цифрой II).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСЛЕДОВАНИЙ

В работе предложена методика оценки зазоров в соединении *Capto* и пути определения диапазона подач осевого инструмента (в частности, сверл), при котором это соединение целесообразно использовать.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McClarence E. Be a time bandit: make tool changing quicker // *Metalworking world*. 2007. Vol. 3. P. 6–7.
2. Livia D., Paul D. A generalized approach of the holder systems for cutting tools // *Academic Journal of Manufacturing Engineering*. 2011. Vol. 9. № 2. P. 12–17.
3. Xiang-yun S., Hong J., Hong-da Z., Shu-lin W. Determination of *Capto* C5 shank's key dimensions // *Materials Science Forum*. 2014. Vol. 800–801. P. 417–423.
4. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов / под ред. В.И. Баранчикова. М.: Машиностроение, 1990. 400 с.
5. *Mechanical Engineering* / ed. M. Gokcek. Rijeka: InTech, 2012. 682 p.
6. Технология машиностроения. В 2 кн. Кн. 1. Основы технологии машиностроения / под ред. С.Л. Мурашкина. М.: Высшая школа, 2005. 278 с.
7. Ермолаев В.В. Технологическая оснастка. Лабораторно-практические работы и курсовое проектирование. М.: Академия, 2012. 320 с.
8. Маслов А.Р. Инструментальные системы машиностроительных производств. М.: Машиностроение, 2006. 335 с.
9. Григорьев С.Н., Кохомский М.В., Маслов А.Р. Инструментальная оснастка станков с ЧПУ. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.

10. Левашкин Д.Г. Размерный анализ процесса обработки базирующих отверстий автоматически сменных узлов призматической формы // Теплофизические и технологические аспекты управления качеством в машиностроении: труды II Международной научно-технической конференции (Резниковские чтения). Тольятти: ТГУ, 2008. Т. 1. С. 212–219.
11. Резников Л.А. Проектирование сложнопрофильного режущего инструмента. Тольятти: ТГУ, 2016. 208 с.
12. Развитие науки о резании металлов / под ред. Н.Н. Зорева. М.: Машиностроение, 1967. 415 с.
13. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х тт. Т. 2 / под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
14. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х тт. / под ред. А.М. Дальского. М.: Машиностроение, 2003. Т. 1. 912 с. Т. 2. 944 с.
15. Режимы резания металлов / под ред. А.Д. Корчемкина. М.: НИИТавтопром, 1995. 456 с.
16. Бочкарёва И.О., Резников Л.А. Целесообразность применения режущего инструмента, оснащенного конусом *Capto* // Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства: труды III Международной научно-технической конференции (Резниковские чтения). Тольятти: ТГУ, 2011. С. 213–225.
17. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistic. Hague: Netherlands, 1983. P. 541–547.
18. Романенко А.М. Режущий инструмент. Кемерово: КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева, 2012. 103 с.
19. Сахаров Г.Н., Арбузов О.Б., Боровой Ю.Л. Металлорежущие инструменты. М.: Машиностроение, 1989. 328 с.
20. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов. М.: Машиностроение, 2009. 640 с.
7. Ermolaev V.V. *Tekhnologicheskaya osnastka. Laboratorno-prakticheskie raboty i kursovoe proektirovanie* [Technological equipment. Laboratory and practical works and course projecting]. Moscow, Akademiya Publ., 2012. 320 p.
8. Maslov A.R. *Instrumentalnye sistemy mashinostroitelnykh proizvodstv* [Tooling systems of mechanical engineering productions]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 335 p.
9. Grigorev S.N., Kokhomskiy M.V., Maslov A.R. *Instrumentalnaya osnastka stankov s ChPU* [Tool equipment of CNC machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 544 p.
10. Levashkin D.G. The dimensional analysis of processing of the basing apertures of automatically replaceable knots of a prismatic form. *Teplofizicheskie i tekhnologicheskie aspekty upravleniya kachestvom v mashinostroenii: trudy II Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Reznikovskie chteniya)*. Togliatti, TGU Publ., 2008. Vol. 1, pp. 212–219.
11. Reznikov L.A. *Proektirovanie slozhnoprofilnogo rezhushchego instrumenta* [Designing of geometrically-complex cutting tool]. Togliatti, TGU Publ., 2016. 208 p.
12. Zorev N.N., ed. *Razvitie nauki o rezanii metallov* [The development of the science of cutting metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 415 p.
13. Kosilova A.G., Meshcheryakova R.K. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya* [Handbook of technologist-mechanician]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. Vol. 2, 496 p.
14. Dal'skiy A.M., ed. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya* [Handbook of technologist-mechanician]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. Vol. 1, 912 p. Vol. 2, 944 p.
15. Korchemkin A.D., ed. *Rezhimy rezaniya metallov* [Metal cutting modes: handbook]. Moscow, NIITavtoprom Publ., 1995. 456 p.
16. Bochkareva I.O., Reznikov L.A. Reasonability of application of cutting tool equipped with *Capto* cone. *Teplofizicheskie i tekhnologicheskie aspekty povysheniya effektivnosti mashinostroitelnogo proizvodstva: trudy III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Reznikovskie chteniya)*. Togliatti, TGU Publ., 2011, pp. 213–225.
17. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistic*. Hague, Netherlands Publ., 1983, pp. 541–547.
18. Romanenko A.M. *Rezhushchiy instrument* [Cutting tool]. Kemerovo, KuzGTU im. T.F. Gorbacheva Publ., 2012. 103 p.
19. Sakharov G.N., Arbuзов O.B., Borovoy Yu.L. *Metallorazhushchie instrumenty* [Metal cutting tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 328 p.
20. Starkov V.K. *Fizika i optimizatsiya rezaniya materialov* [Physics and optimization of cutting materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 640 p.

REFERENCES

1. McClarence E. Be a time bandit: make tool changing quicker. *Metalworking world*, 2007, vol. 3, pp. 6–7.
2. Livia D., Paul D. A generalized approach of the holder systems for cutting tools. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 2011, vol. 9, no. 2, pp. 12–17.
3. Xiang-yun S., Hong J., Hong-da Z., Shu-lin W. Determination of *Capto* C5 shank's key dimensions. *Materials Science Forum*, 2014, vol. 800–801, pp. 417–423.
4. Baranchikov V.I., ed. *Progressivnye rezhushchie instrumenty i rezhimy rezaniya metallov* [Advanced cutting tools and cutting metals: handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 400 p.
5. Gokcek M., ed. *Mechanical Engineering*. Rijeka, InTech Publ., 2012. 682 p.
6. Murashkina S.L., ed. *Tekhnologiya mashinostroeniya. Osnovy tekhnologii mashinostroeniya* [Manufacturing technology. Fundamentals of manufacturing technology]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005. Kn. 1. 278 p.

THE STUDY OF GEOMETRY AND THE APPLICATION AREA
OF CUTTING TOOL WITH *Capto* SHANK

© 2016

L.A. Reznikov, PhD (Engineering),
assistant professor of Chair “Equipment and Technology of Engineering Production”
A.T. Kasimov, student of Chair “Equipment and Technology of Engineering Production”
Togliatti State University, Togliatti (Russia)
I.O. Bochkareva, Chassis Senior Engineer
Nissan Manufacturing Russia, Saint Petersburg (Russia)

Keywords: Morse cone; *Capto* joint; drilling tool; strength.

Abstract: The paper covers the issue of rational application of a tool with *Capto* shank, as well as the conditions for clearance occurrence in the “tool – tool spindle” joint and the dependence of this clearance on the error of manufacturing a hole in the machine spindle.

The authors carried out the calculations of friction and torsion moment when drilling holes using the tool with standard Morse taper shank and *Capto* shank. Based on these calculations, the first technical limitation was obtained – the dependence of feed threshold ensuring the absence of drill turning in machine spindle on the tool diameter. Taking into account the maximum value of tangential stresses in the drilling tool, second technical limitation was obtained – the dependence of feed threshold on a drill diameter based on the necessary tool strength. These technical limitations were used as a principle to define the areas of rational application of standard tool shanks (Morse taper shank in particular) and *Capto* shank.

Using the analytic geometry method, the geometry of *Capto* joint was analyzed and the areas of maximum clearance occurrence in a joint were identified. At a first approximation, the cross section of a joint was displayed as the triangles with rounded corners and the joint total manufacturing error was referred to the vertex angle of a spindle hole. It allowed proving mathematically the area of maximum clearance occurrence and identifying the dependence of maximum clearance on the error of manufacturing a hole in the tool spindle.