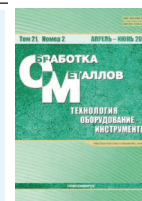




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.ntu.ru/obrabotka_metallov



Исследование процесса резания труднообрабатываемых материалов на микроуровне

Денис Реченко^{а, *}

Омский государственный технический университет, пр. Мира, 11, г. Омск, 644050, Россия

^а  <http://orcid.org/0000-0002-6776-6452>,  rechenko-denis@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.92

История статьи:

Поступила: 21 марта 2019
 Рецензирование: 18 апреля 2019
 Принята к печати: 25 апреля 2019
 Доступно онлайн: 15 июня 2019

Ключевые слова:

Резание материалов
 Финишная обработка
 Твердосплавный инструмент
 Качество

АННОТАЦИЯ

Введение. Качество твердосплавного режущего инструмента, характеризующееся остротой (условным вписанным радиусом округления лезвия), размером микротрещин и микросколов, а также микротвердостью поверхностей режущего клина, определяет качество обработанной поверхности и конечную точность деталей. Современный режущий инструмент совместно с технологической системой позволяет получать точность обработки в пределах 0,01...0,02 мм и шероховатость обработанной поверхности $R_a = 0,32...0,63$ мкм. **Цель работы** – исследование процесса резания труднообрабатываемых материалов на микроуровне для определения работоспособности твердосплавного инструмента с точки зрения возможности формирования стружки при обработке малых толщин срезаемого слоя. **Метод.** Предложен метод исследования процесса резания труднообрабатываемых материалов на микроуровне (натурные испытания) с применением высококачественного режущего твердосплавного инструмента, полученного за счет нового способа сверхскоростного затачивания. **Результаты и обсуждение.** Обоснована и экспериментально подтверждена возможность повышения эффективности твердосплавного режущего инструмента, под которой в работе понимается заданная размерная точность обработки деталей из труднообрабатываемых материалов в несколько микрометров и стабильная шероховатость обработанной поверхности при достаточной стойкости инструмента, с применением высококачественного инструмента, полученного сверхскоростным затачиванием. Высококачественный твердосплавный режущий инструмент, полученный сверхскоростным затачиванием, имеет перспективы применения на авиа- и ракетостроительных предприятиях при изготовлении ключевых высокоточных деталей из труднообрабатываемых материалов. Проведенные эксперименты по исследованию процесса резания труднообрабатываемых материалов на микроуровне с целью определения соотношения толщины срезаемого слоя обрабатываемого материала к условному вписанному радиусу округления лезвия режущего инструмента позволяют определить его работоспособность и максимальную размерную точность лезвийной обработки.

Для цитирования: Реченко Д.С. Исследование процесса резания труднообрабатываемых материалов на микроуровне // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 18–25. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-18-25.

Введение

Чистовая и финишная лезвийная обработка труднообрабатываемых материалов становится все более актуальной в связи с ее применением за исключением шлифовальных и доводочных операций. Финишная лезвийная обработка на микроуровне с применением высококачественного режущего инструмента позволяет получать

экономическую эффективность при изготовлении точных деталей. Однако возникает несколько критических проблем, связанных с получением требуемого качества металлорежущего инструмента, способного производить резание с припуском в несколько микрометров. При этом основная особенность резания на микроуровне состоит в том, что толщина срезаемого слоя сопоставима с условным радиусом округления лезвия режущего инструмента [1], что создает условия резания с отрицательным передним углом режущего клина и приводит к упругопластической деформации поверхностного слоя детали [2–4]. Подобные условия резания приводят

*Адрес для переписки

Реченко Денис Сергеевич, к.т.н., доцент,
 Омский государственный технический университет
 пр. Мира, 11,
 644050, г. Омск, Россия
 Тел.: +7-913-631-46-74, e-mail: rechenko-denis@mail.ru

к формированию дефектного слоя обработанной поверхности. При этом увеличение скорости резания приводит к повышению энергии и сил, затрачиваемых на образование микротрещин, отделяющих материал и в итоге формирующих стружку. В результате некоторых исследований [5–7] определена величина глубины резания, при которой формируется и отделяется стружка с учетом условного вписанного радиуса округления лезвия (рис. 1). При этом определена нейтральная точка и угол сдвига, при которых часть обрабатываемого материала переходит в пластическое деформирование и формирует поверхностный слой обработанной поверхности, а часть переходит в стружку, отделяясь от заготовки. Этими параметрами и характеризуют возможность формирования стружки, а соответственно и процесс резания при малых толщинах срезаемого слоя.

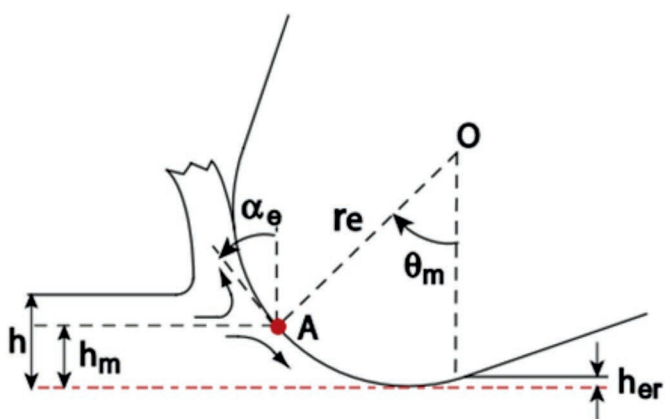


Рис. 1. Схема работы лезвийного инструмента при малых толщинах срезаемого слоя

Fig. 1. The scheme of the blade tool at small thicknesses of the layer being cut

Задача работы сводится к исследованию процесса резания труднообрабатываемых материалов на микроуровне для определения работоспособности твердосплавного инструмента с точки зрения возможности формирования стружки при обработке малых толщин срезаемого слоя.

Методика исследований

В работе [8] обозначена связь между условным радиусом округления лезвия, силой резания и коэффициентом трения, позволяющая определить формирование стружки. В работе [9] разработана модель, дающая возможность прогнозировать так называемую слепую зону,

т. е. минимальную толщину несрезаемого слоя. Подобные подходы позволяют прогнозировать конечное качество обработки. Например, в работе [10] представлено моделирование размерной точности и шероховатости от радиуса округления лезвия и формирования стружки. В работе [11] установлено, что для формирования стружки это отношение величины срезаемого слоя к условному радиусу округления лезвия должно быть $0,2 \dots 0,35$ в зависимости от микроструктуры обрабатываемого материала с учетом структуры материала и модели, основанной на конечных элементах, разработанной в работе [12].

Моделирование процесса резания на микроуровне позволяет прогнозировать остаточные напряжения поверхностного слоя, точность и производительность обработки. При этом моделирование основывается на двух подходах: принципе минимальной энергии и методе бесконечной деформации. В работах [2–4] представлены результаты определения условий формирования стружки в зависимости от условного вписанного радиуса округления лезвия на основе математического подхода и натурных испытаний.

Исследованиями, описанными в работе [13], установлено, что формированием застойной зоны и расположением нейтральной точки определяется углом 45° , соответственно значение минимальной толщины несрезаемого слоя $h_m = 0,29r_e$. Исследованиями (работа [14]) также установлено, что застойная зона формируется при угле $\theta_m = 37,6^\circ$ (т. е. $h_m = 0,21r_e$). При этом данные исследования проводились на алюминиевых материалах. Аналогичные исследования (см. работы [2–4]) позволили определить значение минимальной толщины несрезаемого слоя $h_m = (0,25 \dots 0,3)r_e$.

На основании исследований, проведенных другими авторами, можно сделать вывод, что формирование стружки происходит при соотношении более $h_m = (0,21 \dots 0,3)r_e$ и острота лезвия инструмента оказывает влияние на остаточные напряжения и точность обработки.

Современный металлорежущий инструмент для чистовой обработки имеет остроту лезвия, т. е. условный вписанный радиус округления лезвия порядка $\rho = 15 \dots 40$ мкм, что может обеспечить минимальную толщину несрезаемого слоя в пределах $3,15 \dots 12$ мкм. Соответственно для точности обработки в пределах нескольких

микрометров необходима острота твердосплавного инструмента r менее 5 мкм, что позволит обеспечить минимальную толщину несрезаемого слоя в пределах 1,05...1,50 мкм. При этом в рассмотренных работах приведены предельные значения отношений формирования стружки. Поэтому для надежного обеспечения точности обработки деталей из труднообрабатываемых сплавов 3...5 мкм лезвие инструмента должно иметь соответствующий условный вписанный радиус округления.

Получение высококачественного режущего инструмента осуществляется несколькими методами: доводка алмазными пастами после затачивания; электроалмазное затачивание и сверхскоростное затачивание [15–18]. Метод сверхскоростного затачивания имеет перспективы и позволяет получать работоспособное лез-

вие твердосплавного инструмента, чтобы обеспечить требуемую остроту лезвия (см. рис. 2 и таблицу).

Измерения остроты СТП выполнялись на установке MikroCad Premium, производитель GF Messtechnik GmbH, программа для измерений ODSCAD в ООО «ПРОМТЕХ» (г. Санкт-Петербург).

Помимо качества режущего клина работоспособность металлорежущего инструмента зависит еще от вида упрочняющего покрытия. Наиболее распространенные покрытия на данный момент – это покрытия на основе TiN (толщина 6...12 мкм), но они способны выдерживать термическую нагрузку до 700 °С, при повышении температуры эти покрытия отслаиваются от поверхности и становятся неработоспособными. Наноструктурированные упрочняющие покры-

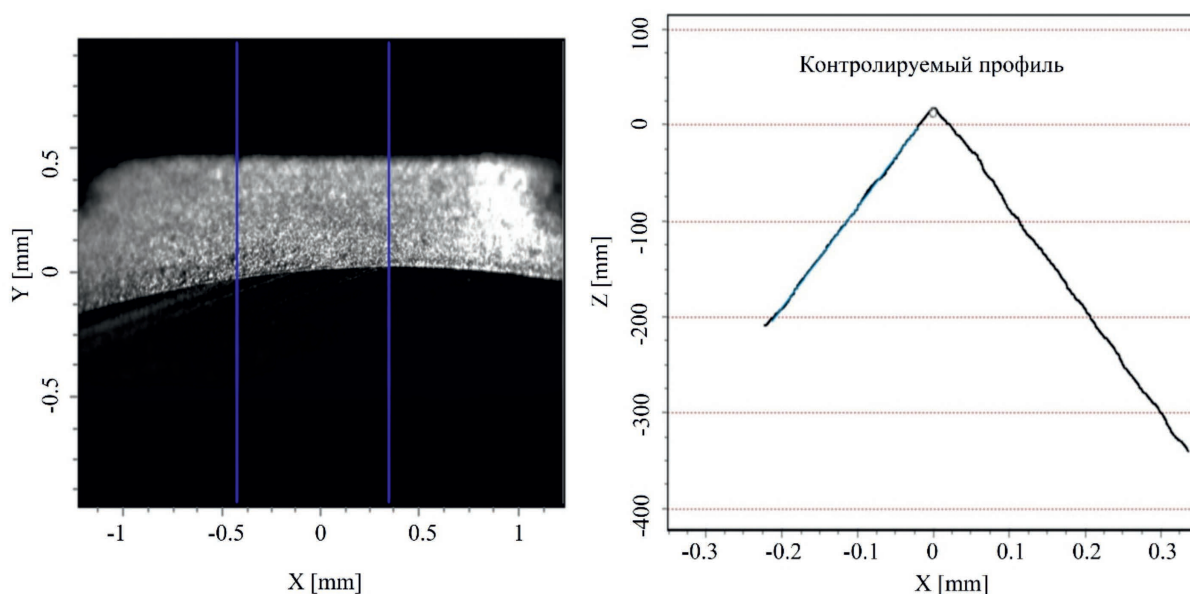


Рис. 2. Результаты измерения остроты лезвия сменной твердосплавной пластины (СТП) после сверхскоростного затачивания ($V = 300...400$ м/с)

Fig. 2. The results of measurement of the sharpness of the blade replaceable carbide inset (RCI) after ultra-high-speed grinding ($V = 300 ... 400$ m/s)

Результаты измерения остроты лезвия сменной твердосплавной пластины (СТП) после сверхскоростного затачивания ($V = 300...400$ м/с)

The results of measuring the sharpness of the blade replaceable carbide inset (RCI) after ultra-high-speed grinding ($V = 300...400$ m/s)

Тип значения / Value type	Среднее / Medium	Минимальное / Minimum	Максимальное / Maximum	Погрешность / Measure of inaccuracy
Радиус / Radius	4,4	3,7	5,1	0,4
Скалывание / Shear	0,8	0,0	3,2	–

тия на основе Si–Ti–N, Al–Si–N и Si–B–C–N сохраняют работоспособность до 1500 °С [19, 20], при этом отработанная технология их нанесения позволяет обеспечивать толщину 2...2,5 мкм, что является критичным при нанесении на поверхности высококачественного режущего клина. В данной работе применялось покрытие Al–Si–N, имеющее микротвердость порядка 24...27 ГПа.

Результаты и их обсуждение

Работоспособность твердосплавного инструмента, как правило, оценивается по параметрам стойкости и безотказности, но для финишного инструмента важным также является минимальный припуск, при котором происходит нормальное формирование стружки. Данный параметр оценивался при обработке титановых сплавов BT3-1 и X18H9T. Обработка деталей типа вал производилась на токарных центрах OKUMA Eco Seris ES-L и OKUMA GENOS L300-M. Режущий инструмент с высококачественным лезвием, имеющим остроту 3,7...5,1 мкм и покрытие Al–Si–N, реализован на базе твердосплавной пластины DNMG150604-MF1 890 (SECO). Режимы обработки: скорость резания $V = 40$ м/мин, подача $S = 0,01$ мм/об, глубина резания $t = 1, 2, 3, 6$ и 9 мкм.

По проведенным исследованиям получены зависимости стойкости токарных пластин при различных глубинах резания, для титанового сплава BT3-1 (рис. 3) и для жаропрочного сплава X18H9T (рис. 4).

Выводы

1. Опыт эксплуатации полученного твердосплавного инструмента показал, что значение минимальной толщины несрезаемого слоя h_m при обработке титанового сплава BT3-1 и X18H9T имеет значение 0,22...0,25. При значении минимальной толщины несрезаемого слоя менее 0,22...0,25 отсутствует формирование стружки, при этих условиях резания происходит царапание и вдавливание обрабатываемого материала.

2. На основании проведенных исследований установлено, что для выполнения условий формирования стружки необходимо обеспечение наименьшего условного вписанного радиуса округления лезвия, т. е. максимальной остроты, а также отсутствие микросколов и трещин, при этом с минимальным окислением обработанных поверхностей.

3. Вследствие сложности процесса формирования стружки, который зависит от нескольких параметров, трудно определить точное значение

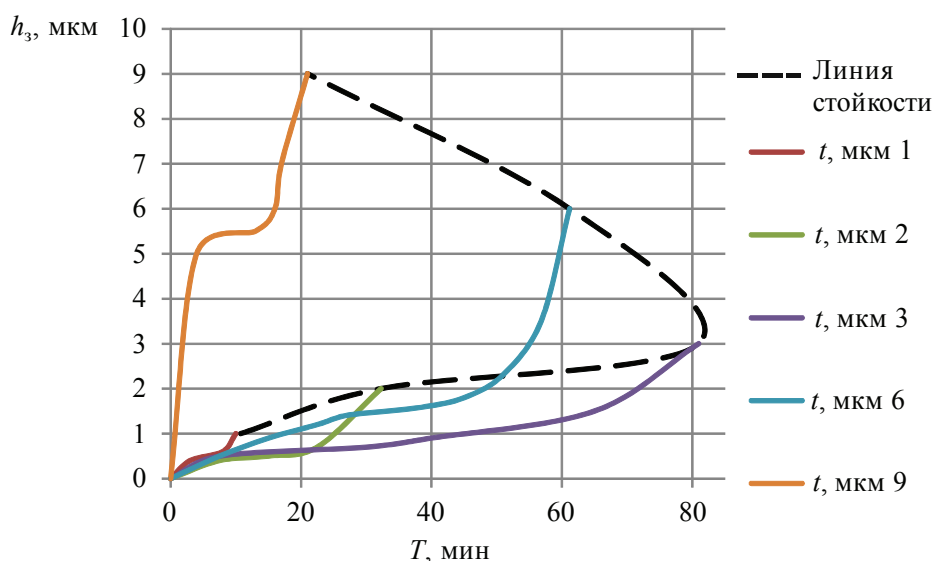


Рис. 3. Зависимость стойкости твердосплавной пластины при обработке титанового сплава BT3-1

Fig. 3. The dependence of the resistance of the carbide plate in the processing of titanium alloy VT3-1

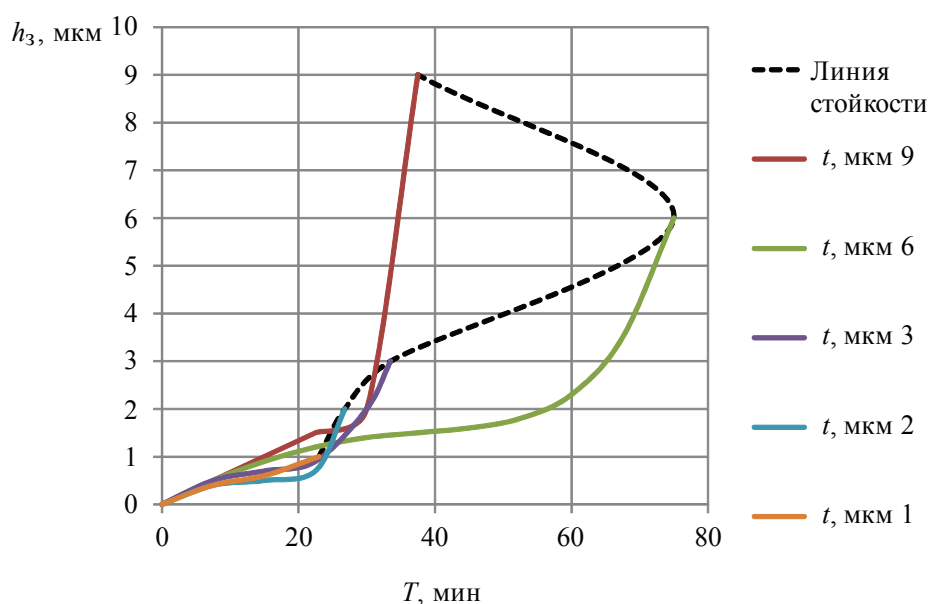


Рис. 4. Зависимость стойкости твердосплавной пластины при обработке жаропрочного сплава X18H9T

Fig. 4. The dependence of the resistance of carbide inserts when machining high-temperature alloy Cr18Ni9Ti

отношения радиуса округления лезвия к толщине срезаемого слоя. Значение минимальной толщины несрезаемого слоя h_m при разных сочетаниях обрабатываемого материала и режущего инструмента может быть определено путем проведения экспериментов по резанию на больших (минимальных) глубинах резания.

Список литературы

1. Denkena B., Biermann D. Cutting edge geometries // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 63 (2). – P. 631–653. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.009.
2. Modeling of minimum uncut chip thickness in micro machining of aluminum / M. Malekian, M.G. Mostofa, S.S. Park, M.B.G. Jun // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – Vol. 212. – P. 553–559. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.05.022.
3. Lucca D.A., Seo Y.W., Komanduri R. Effect of tool edge geometry on energy dissipation in ultraprecision machining // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1993. – Vol. 42. – P. 83–86. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62397-X.
4. Investigations of tool edge radius effect in micromachining: a FEM simulation approach / K.S. Woon, M. Rahman, F.Z. Fang, K.S. Neo, K. Liu // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – Vol. 195. – P. 204–211. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.137.

5. Connolly R., Rubenstein C. The mechanics of continuous chip formation in orthogonal cutting // International Journal of Machine Tool Design and Research. – 1968. – Vol. 8. – P. 159–187. – DOI: 10.1016/0020-7357(68)90003-6.

6. Abdelmoneim M.E., Scrutton R.F. Tool edge roundness and stable built-up formation in finished machining // Journal of Engineering for Industry. – 1974. – Vol. 96 (4). – P. 1258–1267.

7. Komanduri R. Some aspects of machining with negative rake tools simulating grinding // International Journal of Machine Tool Design and Research. – 1971. – Vol. 11. – P. 223–233. – DOI: 10.1016/0020-7357(71)90027-8.

8. Yuan Z.J., Zhou M., Dong S. Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining // Journal of Materials Processing Technology. – 1996. – Vol. 62. – P. 327–330. – DOI: 10.1016/S0924-0136(96)02429-6.

9. Liu X., DeVor R.E., Kapoor S.G. An analytical model for the prediction of minimum chip thickness in micromachining // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2006. – Vol. 128 (2). – P. 474–481. – DOI: 10.1115/1.2162905.

10. Feasibility study of ultimate accuracy in microcutting using molecular dynamics simulation / S. Shimada, N. Ikawa, H. Tanaka, G. Ohmori, J. Uchikoshi, H. Yoshinaga // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1993. – Vol. 42. – P. 91–94. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62399-3.

11. *Vogler M.P., Devor R.E., Kapoor S.G.* On modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling. Part II: Cutting force prediction // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2004. – Vol. 126 (4). – P. 695–705. – DOI: 10.1115/1.1813471.

12. Microstructure-level modeling of ductile iron machining / L. Chuzhoy, R.E. DeVor, S.G. Kapoor, D.J. Bammann // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2002. – Vol. 124. – P. 162–169. – DOI: 10.1115/1.1455642.

13. *L'vov N.P.* Determining the minimum possible chip thickness // *Machine Tools*. – 1969. – Vol. 40. – P. 45.

14. *Basuray P.K., Misra B.K., Lal G.K.* Transition from ploughing to cutting during machining with blunt tools // *Wear*. – 1977. – Vol. 43 (3). – P. 341–349. – DOI: 10.1016/0043-1648(77)90130-2.

15. Hard-alloy metal-cutting tool for the finishing of hard materials / D.S. Rechenko, A.Y. Popov, D.Y. Belan, A.A. Kuznetsov // *Russian Engineering Research*. – 2017. – Vol. 37 (2). – P. 148–149. – DOI: 10.3103/S1068798X17020162.

16. Contact processes in grinding / A. Yanyushkin, D. Lobanov, P. Arkhipov, V. Ivancivsky // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 788. – P. 17–21. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.17.

17. Study on high-speed grinding mechanisms for quality and process efficiency / B. Li, J. Ni, Y. Jianguo, S.Y. Liang // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 70. – P. 813–819.

18. Subsurface damage in high-speed grinding of brittle materials considering kinematic characteristics of the grinding process / C. Wang, Q. Fang, J. Chen, Y. Liu, T. Jin // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 83. – P. 937–948. – DOI: 10.1007/s00170-015-7627-8.

19. *Musil J.* Hard nanocomposite coatings: thermal stability, oxidation resistance and toughness // *Surface & Coatings Technology*. – 2012. – Vol. 207. – P. 50–65. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.05.073.

20. *Musil J.* Recent progress in hard nanocomposite coatings. Pt. 2 // *Galvanotechnik*. – 2010. – Vol. 101, N 9. – P. 2116–2121.

Конфликт интересов

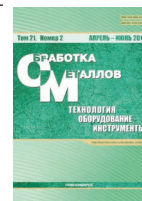
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Автор. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



The Study of the Process of Difficult-to-Machine Materials Cutting at the Micro-Level

Denis Rechenko ^{a, *}

Omsk State Technical University, 11 Mira ave., Omsk, 644050, Russian Federation

^a  <http://orcid.org/0000-0002-6776-6452>,  rechenko-denis@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 21 March 2019

Revised: 18 April 2019

Accepted: 25 April 2019

Available online: 15 June 2019

Keywords:

Material cutting

Finishing

Carbide tools

Quality

ABSTRACT

Introduction. The quality of the carbide cutting tool, characterized by sharpness (the usual inscribed radius of curvature of the blade), the size of microcracks and microshare, as well as the microhardness of the surfaces of the cutting wedge determines the quality of the treated surface and the final accuracy of the parts. The modern cutting tool together with technological system allows to receive accuracy of processing within 0.01...0.02 mm and the roughness of the treated surface $R_a = 0.32...0.63 \mu\text{m}$. **The purpose of the work** is to study the cutting process of difficult-to-machine materials at the micro-level, to determine the performance of carbide tools in terms of the possibility of chip formation in the processing of small thickness of the cut layer **Method.** A method for studying the process of cutting difficult materials at the micro level (full-scale tests) with the use of high-quality carbide cutting tools obtained by a new method of ultra-high-speed sharpening is proposed. **Results and discussion.** The possibility of improving the efficiency of carbide cutting tools, which is understood in the work as a given dimensional accuracy of machining parts from hard materials in a few micrometers and a stable roughness of the treated surface with sufficient tool life, using high-quality tools obtained by high-speed sharpening is substantiated and experimentally confirmed. High-quality carbide cutting tools obtained by ultra-high-speed sharpening has prospects for use in aircraft and rocket-building enterprises in the manufacture of key high-precision parts from difficult materials. The conducted experiments on the study of the cutting process of difficult materials at the micro-level to determine the ratio of the thickness of the cut layer of the processed material to the conventional inscribed radius of rounding of the cutting tool blade, allow to determine its performance and determine the maximum dimensional accuracy of the blade processing.

For citation: Rechenko D.S. The study of the process of difficult-to-machine materials cutting at the micro-level. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 18–25. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-18-25. (In Russian).

References

1. Denkena B., Biermann D. Cutting edge geometries. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2014, vol. 63 (2), pp. 631–653. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.009.
2. Malekian M., Mostofa M.G., Park S.S., Jun M.B.G. Modeling of minimum uncut chip thickness in micro machining of aluminum. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, vol. 212, pp. 553–559. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.05.022.
3. Lucca D.A., Seo Y.W., Komanduri R. Effect of tool edge geometry on energy dissipation in ultraprecision machining. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1993, vol. 42, pp. 83–86. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62397-X.
4. Woon K.S., Rahman M., Fang F.Z., Neo K.S., Liu K. Investigations of tool edge radius effect in micromachining: a FEM simulation. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 195, pp. 204–211. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.137.

* Corresponding author

Rechenko Denis S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Omsk State Technical University,
 11 Prospekt Mira,
 644050, Omsk, Russian Federation
 Tel.: +7-913-631-46-74, e-mail: rechenko-denis@mail.ru

5. Connolly R., Rubenstein C. The mechanics of continuous chip formation in orthogonal cutting. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 1968, vol. 8, pp. 159–187. DOI: 10.1016/0020-7357(68)90003-6.
6. Abdelmoneim M.E., Scrutton R.F. Tool edge roundness and stable built-up formation in finished machining. *Journal of Engineering for Industry*, 1974, vol. 96 (4), pp. 1258–1267.
7. Komanduri R. Some aspects of machining with negative rake tools simulating grinding. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 1971, vol. 11, pp. 223–233. DOI: 10.1016/0020-7357(71)90027-8.
8. Yuan Z.J., Zhou M., Dong S. Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining. *Journal of Material Processing Technology*, 1996, vol. 62, pp. 327–330. DOI: 10.1016/S0924-0136(96)02429-6.
9. Liu X., DeVor R.E., Kapoor S.G. An analytical model for the prediction of minimum chip thickness in micromachining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2006, vol. 128 (2), pp. 474–481. DOI: 10.1115/1.2162905.
10. Shimada S., Ikawa N., Tanaka H., Ohmori G., Uchikoshi J., Yoshinaga H. Feasibility study of ultimate accuracy in microcutting using molecular dynamics simulation. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1993, vol. 42, pp. 91–94. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62399-3.
11. Vogler M.P., Devor R.E., Kapoor S.G. On modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling. Part II: Cutting force prediction. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, vol. 126 (4), pp. 695–705. DOI: 10.1115/1.1813471.
12. Chuzhoy L., Devor R.E., Kapoor S.G., Bammann D.J. Microstructure-level modeling of ductile iron machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2002, vol. 124, pp. 162–169. DOI: 10.1115/1.1455642.
13. L'vov N.P. Determining the minimum possible chip thickness. *Machine Tools*, 1969, vol. 40, p. 45.
14. Basuray P.K., Misra B.K., Lal G.K. Transition from ploughing to cutting during machining with blunt tools. *Wear*, 1977, vol. 43 (3), pp. 341–349. DOI: 10.1016/0043-1648(77)90130-2.
15. Rechenko D.S., Popov A.Y., Belan D.Y., Kuznetsov A.A. Hard-alloy metal-cutting tool for the finishing of hard materials. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37 (2), pp. 148–149. DOI: 10.3103/S1068798X17020162.
16. Yanyushkin A., Lobanov D., Arkhipov P., Ivancivsky V. Contact processes in grinding. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 788, pp. 17–21. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.17.
17. Li B., Ni J., Jianguo Y., Liang S.Y. Study on high-speed grinding mechanisms for quality and process efficiency. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 70, pp. 813–819.
18. Wang C., Fang Q., Chen J., Liu Y., Jin T. Subsurface damage in high-speed grinding of brittle materials considering kinematic characteristics of the grinding process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 83, pp. 937–948. DOI: 10.1007/s00170-015-7627-8.
19. Musil J. Hard nanocomposite coatings: thermal stability, oxidation resistance and toughness. *Surface & Coatings Technology*, 2012, vol. 207, pp. 50–65. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.05.073.
20. Musil J. Recent progress in hard nanocomposite coatings. Pt. 2. *Galvanotechnik*, 2010, vol. 101, no. 9, pp. 2116–2121.

Conflicts of Interest

The author declare no conflict of interest.

© 2019 The Author. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).