

УДК 621.7.01

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

¹Чазов П.А., ¹Беспалов П.Н., ²Коровин Г.И.

¹ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,

Томск, e-mail: chapaese@gmail.com;

²ООО ПК МИОН, e-mail: pk-mion@mail.ru

Статья посвящена анализу современных тенденций в области обработки резанием труднообрабатываемых сталей и титановых сплавов в условиях отечественного и зарубежного авиакосмического производства. Показана актуальность разработки специализированного режущего инструмента – монолитных концевых фрез, рассмотрены вопросы эффективности фрезерования титановых сплавов и труднообрабатываемых сталей, доля применения которых в общей массе изделий авиакосмической техники неуклонно растет. Проведен анализ конструкций концевых фрез ведущих мировых производителей и выявлены основные современные тенденции в области проектирования данных режущих инструментов. Показано, что совершенствование геометрических параметров является основной современной тенденцией в области проектирования концевых фрез для обработки титановых сплавов и труднообрабатываемых сталей, направленной на обеспечение эффективности обработки и выполнение специфичных требований к обработанной поверхности изделий авиакосмической техники.

Ключевые слова: обработка резанием, фрезерование, обработка титановых сплавов, геометрические параметры инструмента, волнообразный зуб

FEATURES APPLICATIONS OF END MILLS FOR PROCESSING TITANIUM ALLOY AND HARD STEELS

¹Chazov P.A., ¹Bespalov P.N., Korovin G.I.

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: chapaese@gmail.com;

²ООО ПК МИОН, e-mail: pk-mion@mail.ru

This article analyzes the current trends in the field of machining of hard steel and titanium alloys in terms of domestic and foreign aerospace production. The urgency of developing a specialized cutting tools – solid end mills, the issues of efficiency of milling titanium alloys and hard-steels, which share the use of a total weight of aerospace products has been steadily increasing. The analysis of structures of end mills world's leading manufacturers, and identified the main current trends in the design of the cutting instruments. It is shown that the improvement of the geometric parameters of a major current trend in the design of end mills for machining titanium alloys and hard-steels, aimed at ensuring the effectiveness of treatment and the implementation of specific requirements for the machined surface of aerospace engineering products.

Keywords: machining, milling, processing of titanium alloys, the geometric parameters of the tool, wavy tooth

Современная тенденция к уменьшению веса летательных аппаратов способствует более широкому применению новых передовых материалов в авиакосмической промышленности, таких как композиты, титановые сплавы и сплавы Инконель. Поскольку эти материалы значительно легче и прочнее традиционных сплавов, каждый из них создает ряд трудностей при обработке, в особенности при фрезеровании и сверлении [10].

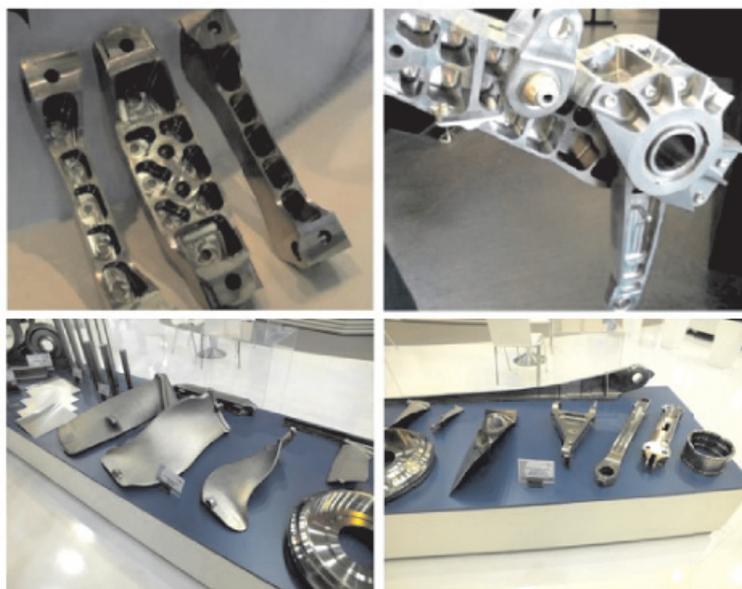
В данном отношении авиакосмическая отрасль обладает выраженной спецификой в плане конструктивной сложности изделий, особых физико-механических свойств применяемых материалов, специальных требований к технологическим методам получения и обработки изделий. При этом постоянное совершенствование конструкций авиакосмической техники требует все большего применения высокопрочных титановых сплавов и труднообрабатываемых

сталей. В настоящее время содержание титановых сплавов в конструкциях современной авиации составляет около 15%, сталей – до 10% (в том числе труднообрабатываемых), и в последующих поколениях авиакосмической техники их доля будет неизбежно расти.

Механическая обработка изделий из данных материалов характеризуется пониженной производительностью. При этом большая часть изделий обладает сложной пространственной формой, имеет множество карманов, тонких стенок и иных сложных в обработке элементов (рисунок). В результате чего при обработке резанием в стружку может уходить до 95% обрабатываемого материала, а операции черного и чистового фрезерования занимают 60–80% от всей трудоемкости механической обработки. Трудоемкость механической обработки титановых сплавов в 3–4 раза больше, чем для углеродистых

сталей, и в 5–7 раз выше, чем для алюминиевых сплавов. По данным ММПШ «Салют» коэффициент относительной обрабатываемости по отношению к стали 45 для титановых сплавов BT5 и BT5-1 составляет 0,35–0,48 и 0,22–0,26 для сплавов BT6, BT20 и BT22 [3].

пример, при изучении обработанных поверхностей деталей видны дефекты, как по шероховатости, так и по ее механическому состоянию. Также встречаются прижоги на поверхностях, в результате чего возникает необходимость дополнительной обработки деталей. Процесс резания сопровождается



Детали авиационной техники

В авиакосмической промышленности, а также в других отраслях индустрии, где есть необходимость не только в обработке крупногабаритных деталей – фрезерование больших карманов и уступов, но и в производстве сложных и высокоточных компонентов небольших размеров, таких как фитинги, кронштейны и другие точные детали из труднообрабатываемых материалов, применение фрез с механическим креплением пластин становится невозможно из-за большого диаметра инструмента. Поэтому для выполнения задачи единственно доступным инструментом являются монолитные фрезы.

Исследования, проводимые в области резания [20], показали, что главная проблема при обработке нержавеющей стали и титана – это высокая температура на кромке и высокая адгезия, ведущая к образованию нароста. Из-за этого титан обрабатывается на низких скоростях с относительно высокой и равномерной подачей. При низких скоростях резания наблюдается абразивный и адгезионный износ, которые дополняют друг друга. Повышение скорости и подачи ведет к увеличению концентрации температур и напряжений у режущих кромок инструмента [2]. На-

выкрашиванием и чрезмерным износом режущих кромок инструмента [8].

Другой серьезной проблемой является обеспечение требуемого качества поверхности, формируемой после обработки резанием, в отношении физико-механических характеристик поверхностного слоя, являющихся критичными для эксплуатационных свойств изделий авиакосмической техники. Титановые сплавы и труднообрабатываемые стали склонны к деформационному упрочнению, возникающему вследствие специфики напряженно-деформированного состояния в зоне резания, особых механических и теплофизических свойств.

Особенности кинематики процесса фрезерования в сочетании со специфическими физико-механическими свойствами титановых сплавов и труднообрабатываемых сталей приводят к возникновению вибраций технологической системы, приводящих к значительному падению качества обработанной поверхности, снижению ресурса инструмента и производительности процесса механической обработки. Данная проблема особенно остро проявляется при фрезеровании инструментом с соотношением длины рабочей части к диаметру более трех, применение которого обусловлено

необходимостью обработки изделий сложной пространственной формы, характерных для авиакосмической техники [18].

Согласно ряду исследований [1, 17], ключевую роль в плавности процесса резания играет угол наклона винтовой канавки концевой фрезы. Именно он оказывает решающее влияние на ее виброустойчивость, так как от его величины зависит величина осевых усилий, стремящихся выдернуть фрезу из шпинделя. Следует отметить, что фреза гладко обрабатывает поверхность заготовки только тогда, когда ее положение стабильно, то есть в любой момент времени хотя бы одно из режущих лезвий постоянно находится в контакте с обрабатываемой поверхностью [6]. Это условие определяет минимальную глубину заглупления фрезы, которое определяется расстоянием между витками в вертикальной плоскости, проходящей через ось фрезы. Если это условие нарушается, и фреза перестает контактировать с обрабатываемой заготовкой, она сразу подвергнется ударной нагрузке, которая будет стремиться изогнуть ее. Естественно, при этом возникают вибрации, которые приводят к более быстрому износу режущих кромок [22].

Практикой было установлено, что на угол наклона винтовой канавки концевой фрезы сильное влияние оказывают свойства обрабатываемого материала. Чем он мягче, тем угол наклона больше. Например, для обработки алюминия и меди он равняется 35–40 градусам, а для фрезерования стали – 25 градусам и меньше [4]. Чтобы сделать концевые фрезы универсальными, то есть пригодными для обработки разных материалов, угол винтовой канавки стали выполнять переменным [9]. Это позволяет не только улучшить отвод стружки, но и ускоряет обработку прочных и сверхпрочных материалов.

Тенденции современного рынка режущего инструмента таковы, что для поддержания конкурентоспособности производители режущего инструмента вынуждены постоянно искать новые решения для обеспечения эффективности механической обработки. Разрабатываются такие новые геометрии режущей части концевых фрез, чтобы ими стало возможно работать с конкретными группами материалов. Постоянно идут эксперименты с формой режущей кромки, чтобы обеспечить обработку резанием на более высоких скоростях и одновременно при этом получать отфрезерованные поверхности с лучшим качеством.

Наиболее крупными мировыми производителями, специализирующимися на производстве фрез для обработки титановых сплавов и труднообрабатываемых сталей, являются следующие компании: Minicut

International Inc (Канада), Hanita metal works (Израиль), Melin Tool Company (США), Dauphin Precision Tool (США), ООО «ПК МИОН» (Россия) и др.

Так фрезы серии LIST M фирмы Minicut International Inc. (Канада), предназначенные для черновой обработки титановых сплавов и других труднообрабатываемых материалов, имеют заднюю поверхность с выкружками, чередующимися в шахматном порядке от зуба к зубу, что обеспечивает деление срезаемого слоя и эффективное стружкодробление, а также способствует повышению производительности [11]. Зубья фрез серии Crest-Kut тип KPSC, KPAC фирмы Weldon (США), предназначенных для черновой и чистой обработки авиационных материалов, выполнены таким образом, что развертка режущей кромки является синусоидой, которая способствует удалению стружки из зоны резания и повышению качества поверхности [12]. Аналогичную конструкцию имеют фрезы серии Aero-Cut тип CCAC4 и CCAC6 фирмы Melin (США) [13]. Фрезы серии WavCut фирмы Hanita (Израиль) предназначены для обработки титановых сплавов и нержавеющей сталей, в том числе при большой ширине фрезерования, они имеют переменный угол наклона стружечных канавок, за счет чего обеспечивается повышение производительности и улучшается отвод стружки из зоны резания [14]. Конструкция фрез серии 711, выпускаемых ООО «ПК МИОН», имеет режущую кромку, находящуюся на цилиндрической образующей, и переменный угол наклона стружечных канавок [15].

Таким образом, становится очевидным, что совершенствование геометрических параметров является основной современной тенденцией в области проектирования концевых фрез для обработки титановых сплавов и труднообрабатываемых сталей, направленной на обеспечение эффективности обработки и выполнение специфических требований к обработанной поверхности изделий авиакосмической техники.

Список литературы

1. Афонасов А.И. Влияние среды на процесс резания титановых сплавов // Известия Томского политехнического института. – 1970. – № 173. – С. 137–141.
2. Бондарь С.В., Ласуков А.А. Изучение образования стружки при обработке жаропрочного сплава // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе. Материалы 10-ой Всероссийской науч.-практич. Конференции. – Новосибирск.
3. Давыденко Л.В. Обоснование требований к режимам термической обработки «альфа»+«бета»-титановых сплавов, обеспечивающим оптимальный комплекс механических свойств и обрабатываемости резанием: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01. – М., 2003.
4. Емельянов В.Д. Формообразование осевого инструмента с переменным углом подъема спирали для обработки

труднообрабатываемых материалов // Актуальные вопросы технических наук: материалы II междунар. науч. конф. (г. Пермь, февраль 2013 г.). – Пермь: Меркурий, 2013. – С. 53–55.

5. Ласуков А.А. Повышение работоспособности инструмента ионной имплантацией в условиях элементарного стружкообразования при обработке труднообрабатываемых сплавов: дис. ... канд. техн. наук. – Юрга, 2006.

6. Ласуков А.А. Некоторые вопросы при обработке жаропрочных и титановых сплавов // Современные технологические системы в машиностроении (СТСМ2003): сборник тезисов докладов междунар. науч.-практ. конференции. – Барнаул: Изд-во Алт. Гос. Тех.ун-та им. Ползунова.

7. Пачурин Д. В., Орлова Н. Ю. Обработка титана и титановых сплавов // Научная Сессия НИЯУ МИФИ-2014. Сборник научных. – С. 93.

8. Полетика М.Ф., Афонасов А.И. Характер износа твёрдосплавного инструмента при точении труднообрабатываемых сплавов титана // Известия Томского политехнического института. – 1976. – Т. 224. – С. 144–147.

9. Потапова М.С., Виноградов Д.В. Обзор фрез с криволинейной режущей кромкой // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2014. – № 11.

10. Фаворский В.В. М.И.В. Космонавтика и ракетно-космическая промышленность. Книга 2. Развитие отрасли (1976-1992). Сотрудничество в космосе. – М.: Машиностроение, 2003. – 434 с. – 2000 экз. – ISBN 5-217-03194-8.

11. Каталог режущего инструмента. – URL: http://minicut.com/wp-content/uploads/catalogues/catch_the_wave_titanium.pdf.

12. Каталог режущего инструмента. – URL: <https://heritagecutter.com/BrubakerWeldon/PublicStore/catalog/M42-Multi-Flute-CC,228.aspx>.

13. Каталог режущего инструмента. – URL: <http://www.endmill.com/pages/software.html>.

14. Каталог режущего инструмента. – URL: https://www.widia.com/content/dam/kennametal/widia/common/resources/downloads/literature/WIDIA%20Catalogs/Hanita-Rubig_A-09-02077EN_mm.pdf.

15. Каталог режущего инструмента. – URL: http://tdmion.ru/files/Frezy_koncevye_iz_bystrorezhushhej_stali-4.pdf.

16. Каталог режущего инструмента. – URL: <http://vsegost.com/Catalog/32/32392.shtml>.

17. Durul U., Özel T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys.

18. Huang P. et A. Milling force vibration analysis in high-speed-milling titanium alloy using variable pitch angle mill // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2012. – Т. 58. – № 1–4. – С. 153–160.

19. Wan M., Zhang W.-H., Yang Y. Phase width analysis of cutting forces considering bottom edge cutting and cutter runout calibration in flat end milling of titanium alloy // Journal of Materials Processing Technology. – Vol. 211, Iss. 11. – 2011.

20. Wang Z., Nakashima S., Larson M. Energy Efficient Machining of Titanium Alloys by Controlling Cutting Temperature and Vibration «in» All Documents; did you mean 6. wavy z., nakashima s., large m. eng efficient machining of titanium allows by controlling.

21. Yang D., Liu Z. Surface topography analysis and cutting parameters optimization for peripheral milling titanium alloy Ti–6Al–4V // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2015. – Т. 51. – С. 192–200.

22. Zelinsky P. Getting the time out of titanium // Modern Machine Shop. – 2005.

современном этапе. Материалы 10-ой Всероссийской науч.-практ. Конференции. Новосибирск.

3. Davydenko L.V. Obosnovanie trebovanij k rezhimam termicheskoj obrabotki «alfa»+beta-titanovyh spлавov, obespechivajushhim optimalnyj kompleks mehanicheskikh svojstv i obrabatyvaemosti rezaniem // dissertacija kandidata tehniceskikh nauk : 05.16.01 Moskva 2003.

4. Emeljanov V.D. Formoobrazovanie oseвого instrumenta s peremennym uglom podema spirali dlja obrabotki trudnoobrabatyvaemyh materialov // Aktualnye voprosy tehniceskikh nauk: materialy II mezhdunar. науч. конф. (g. Perm, fevral 2013 g.). Perm: Merkurij, 2013. pp. 53–55.

5. Lasukov A.A. povyshenie rabotosposobnosti instrumenta ionnoj implantacij v uslovijah jelementnogo struzhkoobrazovanija pri obrabotke trudnoobrabatyvaemyh spлавov // dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk / Jurga, 2006.

6. Lasukov A.A. Nekotorye voprosy pri obrabotke zharoprochnyh i titanovyh spлавov // Sovremennye tehnologicheskie sistemy v mashinostroenii(STSM2003) / Sbornik tezisov dokladov mezhdunar. науч.-prakt. Konferencii. Barnaul: Izd-vo Alt. Gos. Teh.un-ta im.Polzunova.

7. Pachurin D. V., Orlova N. Ju. Obrabotka titana i titanovyh spлавov // Nauchnaja Sessija NIJaU MIFI-2014. Sbornik nauchnyh. pp. 93.

8. Poletika M.F., Afonasov A.I. Harakter iznosa tvjordospavnogo instrumenta pri tochenii trudnoobrabatyvaemyh spлавov titana // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo instituta. 1976. T. 224. pp. 144–147.

9. Potapova M.S., Vinogradov D.V. Obzor fрез s krivolinejnoy rezhushhej kromkoj // Nauka i obrazovanie: jelektronnoe nauchno-tehnicheskoe izdanie. 2014. no. 11.

10. Favorskij V.V. M.I.V. Kosmonavtika i raketno-kosmicheskaja promyshlennost. Kniga 2. Razvitie otrasli (1976–1992). Sotrudnichestvo v kosmose. M.: Mashinostroenie, 2003. 434 p. 2000 jekz. ISBN 5-217-03194-8.

11. Каталог rezhushhego instrumenta. URL: http://minicut.com/wp-content/uploads/catalogues/catch_the_wave_titanium.pdf.

12. Каталог rezhushhego instrumenta. URL: <https://heritagecutter.com/BrubakerWeldon/PublicStore/catalog/M42-Multi-Flute-CC,228.aspx>.

13. Каталог rezhushhego instrumenta. URL:<http://www.endmill.com/pages/software.html>.

14. Каталог rezhushhego instrumenta. URL: https://www.widia.com/content/dam/kennametal/widia/common/resources/downloads/literature/WIDIA%20Catalogs/Hanita-Rubig_A-09-02077EN_mm.pdf.

15. Каталог rezhushhego instrumenta. URL: http://tdmion.ru/files/Frezy_koncevye_iz_bystrorezhushhej_stali-4.pdf.

16. Каталог rezhushhego instrumenta. URL: <http://vsegost.com/Catalog/32/32392.shtml>.

17. Durul U., Özel T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys.

18. Huang P. et A. Milling force vibration analysis in high-speed-milling titanium alloy using variable pitch angle mill. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012. T. 58. no. 1–4. pp. 153–160.

19. Wan M., Zhang W.-H., Yang Y. Phase width analysis of cutting forces considering bottom edge cutting and cutter runout calibration in flat end milling of titanium alloy. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 211, Iss. 11. 2011.

20. Wang Z., Nakashima S., Larson M. Energy Efficient Machining of Titanium Alloys by Controlling Cutting Temperature and Vibration «in» All Documents; did you mean 6. wavy z., nakashima s., large m. eng efficient machining of titanium allows by controlling.

21. Yang D., Liu Z. Surface topography analysis and cutting parameters optimization for peripheral milling titanium alloy Ti–6Al–4V International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2015. T. 51. pp. 192–200.

22. Zelinsky P. Getting the time out of titanium Modern Machine Shop. 2005.

References

1. Afonasov A.I. Vlijanie sredy na process rezanija titanovyh spлавov //Izvestija Tomskogo politehnicheskogo instituta. 1970. no. 173. pp. 137–141.

2. Bondar S.V., Lasukov A.A. Izuchenie obrazovanija struzhki pri obrabotke zharoprochnogo spлавa // Problemy povyshenija jeffektivnosti metalloobrabotki v promyshlennosti na