

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ И ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

*Горшков А.О., Давыдов А.А.*

*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия*

**Ключевые слова:** кривые Соломона, высокоскоростная обработка, система управления, режимы резания, траектории движения инструмента, стружка, дискретные методы обработки, производительность, система охлаждения.

**Аннотация.** Развитие металлообработки в настоящий момент достигается совершенствованием имеющихся и созданием новых многофункциональных компоновок металлообрабатывающего оборудования, изменением геометрической формы режущего инструмента, а также применением новых разнообразных материалов для изготовления узлов станка, резцов, фрез и т.д. Однако одной из слабо развитых направлений в рассматриваемой области является методология обработки. На большинстве промышленных предприятий используются передовое металлообрабатывающее оборудование, режущие инструменты, различные вспомогательные системы современного образца, однако методы формообразования поверхностей изделий применяются такие же, как и десятилетия назад. Слабое развитие этого направления препятствует прогрессированию металлообрабатывающей области в целом. Данная статья направлена на теоретическое выявление основных особенностей высокоскоростной обработки и выделение её преимуществ по сравнению с «традиционными» методами обработки. Также в работе рассмотрены некоторые достижения исследователей в данной области и определены перспективные направления развития ВСО.

## PROMISING DIRECTIONS OF DEVELOPMENT AND FEATURES OF HIGH-SPEED PROCESSING

*Gorshkov A.O., Davydov A.A.*

*Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

**Keywords:** Solomon curves, high-speed machining, control system, cutting conditions, tool paths, chips, discrete processing methods, productivity, cooling system.

**Abstract.** The development of metalworking is currently achieved by improving existing and creating new multifunctional layouts of metalworking equipment, changing the geometric shape of the cutting tool, as well as using various new materials for the manufacture of machine components, cutters, milling cutters, etc. However, one of the underdeveloped areas in this area is processing methodology. Most industrial enterprises use advanced metalworking equipment, cutting tools, various auxiliary systems of a modern design, however, the methods of shaping the surfaces of products are the same as they were decades ago. The weak development of this direction hinders the progress of the metalworking area. This article is aimed at theoretically identifying the main features of HSM and highlighting its advantages over "traditional" processing methods. The paper also considers some of the achievements of researchers in this field and identifies promising areas for the development of HSM.

Высокоскоростная обработка (ВСО) – одно из перспективных направлений современного машиностроения. Достижение высокой производительности выпуска изделий на данный может быть осуществлено при внедрении и развитии направления высокоскоростного резания.

ВСО теоретически обоснована кривыми Соломона (рис. 1), которые позволяют сделать вывод о том, что при достижении определенных скоростей резания наблюдается снижение сил резания. Также в зоне резания снижаются значения выделяемой в процессе обработки температуры. Это объясняется тем, что в некотором промежутке скоростей основная масса тепла концентрируется в стружке, не успевая переходить в заготовку и инструмент [1].

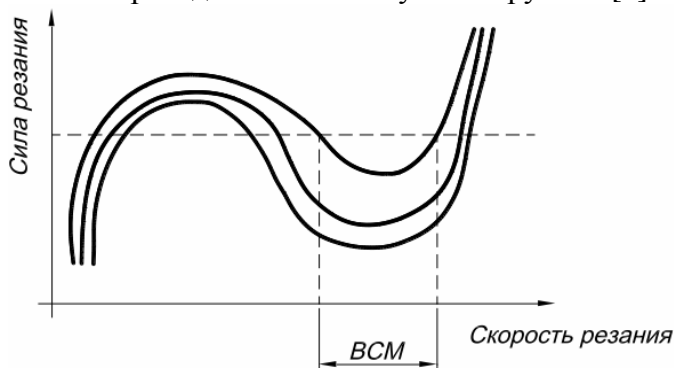


Рис. 1. Обобщенная качественная зависимость силы от скорости резания

В настоящее время развития металлообрабатывающей промышленности в основном реализуется на совершенствовании обрабатываемого оборудования и инструмента. В мире пытаются создать более износостойкие режущие инструменты, способные выдержать высокие механические нагрузки и температуры в зоне резания; жесткие узлы станков, которые будут обеспечивать возможность обработки металлов при значениях сил резания, превышающих эти показатели в настоящее время и т.д. Однако развитие направления ВСО позволит уйти от «традиционных» методов обработки, что позволит повысить производительность промышленных предприятий без использования высокопрочных и дорогостоящих элементов станка и режущего инструмента.

Использование ВСО на производственном предприятии позволит снизить тепловыделение и параметры сил резания в зоне обработки, что увеличит срок службы режущего инструмента.

По сравнению с «традиционными» методами обработки ВСО отличается тем, что время контакта инструмента с отделяемым материалом значительно меньше, за счёт чего большая часть выделяемого тепла удаляется вместе со стружкой. При этом заготовка и обрабатывающий инструмент не успевают нагреваться до высоких для них показателей температуры. При ВСО площадь контакта инструмента и заготовки меньше, чем при «традиционных» способах обработки, что также способствует отведению тепла от этих элементов за счет взаимодействия охлаждающей среды с большими площадями поверхностей инструмента и заготовки.

Стоит отметить, что использование высокой скорости обработки, обеспечивающейся за счет высоких показателей скорости вращения шпинделя ( $>60000 \text{ мин}^{-1}$ ), позволит повысить производительность предприятия с таким

оборудованием в разы, что предоставит возможность увеличить объем выпускаемой продукции. По следующей формуле можно теоретически оценить скорость обработки при вращении шпинделя «традиционного» станка, к примеру, в 20000 мин<sup>-1</sup> и оборудования для высокоскоростной обработки в 60000 мин<sup>-1</sup>,

$$V_c = \frac{\pi \cdot D_m \cdot n}{1000}, \quad (1)$$

где  $V_c$  – скорость резания, м/мин;

$D_m$  – диаметр обработки (диаметр осевого инструмента), мм;

$n$  – частота вращения шпинделя, мин<sup>-1</sup> [2, с. 10].

Таким образом, можно сделать вывод, что скорость резания при ВСО будет превосходить «традиционную» обработку в 3 раза. Также ВСО позволит упростить производственный процесс и повысить качество выпускаемых изделий.

К основным преимуществам ВСО по сравнению с «традиционными» методами обработки можно также отнести высокую производительность, меньшее энергопотребление обрабатывающего оборудования, повышение загрузки и использования мощности станков и оборудования, сокращение издержек производства, обеспечение непрерывного технического и технологического процессов [3].

Снижение сил резания позволяет осуществить замену жестких габаритных элементов станка на более компактные, что предоставит возможность разместить большее количество оборудования на производственных площадях и обеспечить больший объем выпускаемой продукции.

Достаточно компактным и производительным оборудованием, которое может использоваться в качестве примера для реализации станков ВСО, являются стоматологические устройства и станки для зубопротезирования, такие как стоматологический 5 – осевой фрезерный станок Redon GTR, Roland DWX-42W, Dental Plus RS5. При габаритных размерах 630x660x760 мм и весом 160 кг Redon GTR позволяет обеспечить вращение шпинделя до 60000 об/мин и осуществлять обработку таких материалов, как титан, цирконий и кобальто-хромовые сплавы.

В процессе ВСО важной составляющей является вид и размер стружки. Она должна быть дискретна, т.е. не допускается отделение витой стружки, т.к. отвод тепла и отсекаемых кусков материала из рабочей области будет значительно затруднен. Поэтому целесообразнее использовать дискретные методы обработки, которые включают в себя фрезерование, шлифование и другие способы, характерные вращением инструмента вокруг своей оси в процессе резания. Также стоит заметить, что разделение на фрезерование и шлифование при ВСО не имеет особого смысла и отличия между тем или иным процессом практически невозможно определить. Единственное, что может выступить в роли отличительного параметра, так это используемый материал режущего инструмента.

Система охлаждения с использованием СОЖ в значительной степени снижает стойкость инструмента. Постоянные значения тепловой нагрузки, даже при высоких показателях температуры, оказывают меньшее действие на режущий инструмент, чем меняющаяся при относительно низких температурах циклическая нагрузка. Наиболее предпочтительным является охлаждение масляным туманом и обдув инструмента [4, 5].

Стоит уделить особое внимание подборам режимов резания при ВСО. Помимо снижения сил резания следует учитывать интервал частот, в котором резание осуществляется более стабильно без вибраций и дробления. В работе 5 автор утверждает о том, что если волнистость обрабатываемой поверхности и вибрации инструмента находятся в одной фазе (в резонансе), то процесс резания протекает наиболее стабильно, даже если увеличить глубину резания в 2-3 раза. Упрощенный график стабильных зон обработки представлен на рисунке 2.

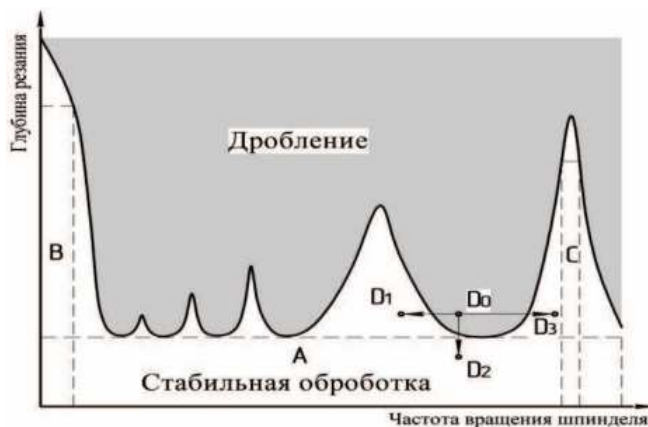


Рис. 2. Характерный профиль стабильных зон обработки

В соответствии с профилем, представленном на рисунке 2 можно сделать вывод, что в зоне А осуществляется стабильная обработка при определенных значениях глубины резания и скорости вращения шпинделя. Производительность в данном промежутке ограничивается максимальной частотой вращения шпинделя.

В зоне В при любых значениях глубины резания обработка проходит стабильно, но при этом на малых оборотах шпинделя производительность невысокая, так как она ограничивается жесткостью станка и инструмента. Это режим силового резания [6].

Максимальная производительности возможно добиться при оптимальном сочетании глубины резания и частоты вращения шпинделя, то есть в тех случаях, когда частота вращения шпинделя находится в оптимальной зоне обработки, в зоне С [6].

«Точка  $D_0$  соответствует режимам, при которых обработка выполняется с дроблением. Для устранения его можно уйти в точку  $D_1$ , либо уменьшить глубину резания и уйти в точку  $D_2$ . Производительность при этом уменьшится. Можно также увеличить частоту вращения шпинделя и уйти в

точку D<sub>3</sub>. Производительность при этом увеличится, но придётся повторить поиск зон стабильной обработки» [6, с. 30].

Оптимальные зоны резания определяются многократным проходами на тестовой заготовке с разными скоростями вращения шпинделя. Далее увеличивают глубину резания и повторяют действия, указанные выше. Оптимальные параметры обработки определяют по качеству обработанной поверхности на каждом проходе. В итоге составляется диаграмма (рис. 3), которая позволяет определить оптимальные и производительные параметры обработки [6].



Рис. 3. Диаграмма зон стабильности

На данный момент системы управления обрабатывающего оборудования автоматизированы, но полностью автоматическое построение траекторий движений инструмента и управление органами станка до сих пор не реализованы. Стоит учитывать, что создаваемая система управления должна не только составлять маршрут инструмента последовательность обработки, но и прогнозировать поведение системы во времени, посредством установленного количества датчиков обеспечивать безопасность работы, «отслеживать» изменение формы заготовки и корректировать свои действия при необходимости, а также определять износ инструмента и заменить его аналогичным из ряда имеющихся.

Система автоматического управления металлорежущим станком может быть построена с применением теории о геометрии неидеальных объектах, что позволит не только построить корректный план обработки, но и добиться выпуск продукции наиболее приближенной по форме и размерам к желаемому результату. Основой геометрии неидеальных объектов является структурно-параметрическое представление объектов в шестимерном пространстве, определяемом линейными и угловыми векторами [7].

При реализации автоматического выполнения процесса резания также следует автоматизировать и такие узлы, как устройства ориентации и закрепления заготовок и инструмента. Каждый из этих узлов должен иметь

возможность произвести самостоятельную смену инструмента или оборудования для закрепления заготовки при необходимости. В зависимости от формы изделия и её заготовки могут быть установлены тисы, кулачковые патроны, призматические зажимы и т.д., которые будут находиться в расположенном рядом магазине для установки заготовок. Аналогичная ситуация обстоит и с режущим инструментом. В зависимости от изготавливаемой детали может варьироваться размерный ряд инструмента, его материал, форма и т.д. Также следует принять во внимание возможность автоматической смены инструмента при его износе на аналогичный из инструментального магазина.

Управляющая программа для осуществления ВСО должна обеспечивать постоянство условий резания и сглаженность траектории движения инструмента [6].

Таким образом, подведя итоги всему вышесказанному, можно выделить некоторые основные особенности ВСО:

- сниженные силы резания, позволяющие использовать более компактные и менее жесткие узлы станка;
- использование дискретных методов обработки;
- необходимость в развитой системе управления;
- отведение большого объема тепла из зоны резания со стружкой;
- уделение особого внимания подбору режимов резания.

В настоящее время существует множество исследований в области ВСО, однако внятных объяснений этого метода до сих пор нет, что в значительной степени затрудняет использование всех возможностей рассматриваемой технологии. Для развития ВСО и повышения производительности выпускаемой продукции следует уделить особое внимание разработки автоматической системы управления, провести исследования в области режимов резания, что позволит установить некоторую закономерность параметров резания и позволит осуществлять подбор оптимальных режимов резания, также стоит уделить внимание компактности станков ВСО и обрабатываемому инструменту. Это основные области, которым следует уделить особое внимание для достижения высокой производительности и многофункциональности ВСО, что в настоящее время является приоритетом для развития машиностроения, станкостроения, судостроения и многих других областей промышленности.

### **Список литературы**

1. Григорьев М.А., Кочкина В.А., Зверинцева Л.В. Проблемы повышения эффективности высокоскоростной обработки закаленных сталей на производстве // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2018. – Т. 1. – С. 21-23.
2. Болотов М.А., Дмитриев В.Н., Проничев Н.Д., Смелов В.Г., Сурков О.С. Высокоскоростная и высокопроизводительная обработка (режимы, характеристика станков, инструмент): Методические указания. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. – 88 с.

3. Сергеев Д.А. Высокоскоростная обработка резанием (Современный этап) // Цифровая наука. – 2022. – №1. – С. 34-37.
4. Виттингтон К., Власов В. Высокоскоростная механообработка // САПР и графика. – 2002. – №11. – С. 22-26.
5. Степанов А. Высокоскоростное фрезерование в современном производстве // CAD/CAM/CAE Observer. – 2003. – №4. – С. 1-8.
6. Оленин Л.Д., Очкин Д.И. О некоторых особенностях фрезерования в режиме высокоскоростной обработки (ВСО) // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2014. – Т. 2. – С. 25-31.
7. Лелюхин В.Е., Колесникова О.В. Геометрия неидеальных объектов в судостроении и судоремонте // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2020. – №1. С. 31-44.

### References

1. Grigoriev M.A., Kochkina V.A., Zverintseva L.V. Problems of increasing the efficiency of high-speed processing of hardened steels in production // Actual problems of aviation and cosmonautics. 2018, vol. 1, pp. 21-23.
2. Bolotov M.A., Dmitriev V.N., Pronichev N.D., Smelov V.G., Surkov O.S. High-speed and high-performance processing (modes, characteristics of machines, tools): Guidelines. – Samara: Samar Publ. house state aerospace. un-ty, 2010. – 88 p.
3. Sergeev D.A. High-speed cutting (Modern stage) // Digital Science. 2022, no. 1, pp. 34-37.
4. Whittington K., Vlasov V. High-speed machining // CAD and graphics. 2002, no. 11, pp. 22- 26.
5. Stepanov A. High-speed milling in modern production // CAD/CAM/CAE Observer. 2003, no. 4, pp 1-8.
6. Olenin L.D., Ochkin D.I. On some features of milling in high-speed machining mode (HSM) // Proceedings of the Moscow State Technical University MAMI. 2014, vol. 2, pp. 25-31.
7. Lelyukhin V.E., Kolesnikova O.V. Geometry of non-ideal objects in shipbuilding and ship repair // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine equipment and technology. 2020, no 1, pp. 31-44.

<b>Горшков Андрей Олегович</b> – студент	<b>Gorshkov Andrey Olegovich</b> – student
<b>Давыдов Антон Аркадьевич</b> – студент	<b>Davydov Anton Arkadyevich</b> – student
andreyolegovich1999@gmail.com	

*Received 03.11.2022*