

УДК 621.9

Е.Э. Фельдштейн

## ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СВЕРХСКОРОСТНОГО РЕЗАНИЯ

*Зеленогурский университет  
Зелена Гура, Польша*

Увеличение скоростей резания до уровня, значительно превышающего традиционный, в настоящее время рассматривается как магистральное направление повышения производительности, точности и качества обработки. Существуют разные точки зрения относительно уровня скоростей сверхскоростного резания (*high speed cutting – HSC*). В настоящее время он привязывается к обрабатываемости того или иного материала (рис. 1). Например, растачивание отверстий и фрезерование блоков автомобильных двигателей из силумина производят со скоростями 7000...8000 м/мин, развертывание – 1000 м/мин. Однако обработка никелевых сплавов со скоростями свыше 50 м/мин уже является сверхскоростной, поскольку эти скорости на порядок превышают традиционные.

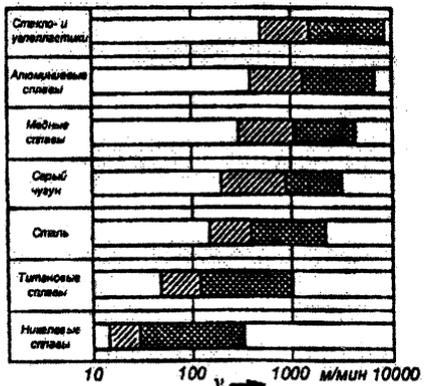


Рис. 1. Уровни скоростей резания при обработке различных материалов [1, 2]:

светлый фон – зона традиционных скоростей; косая штриховка – переходная область; сетчатая штриховка – зона HSC

Обработка HSC имеет целый ряд преимуществ по сравнению с резанием на традиционных скоростях (табл. 1).

Таблица 1

Достоинства, условия и области использования HSC

Достоинства	Условия применения	Области использования
Высокая производительность	Обработка деталей из сталей, чугунов, легких сплавов	Изделия аэрокосмической промышленности, производство литейных форм и пресс-форм для объемной обработки
Высокие качество и точность обработанной поверхности	Прецизионная обработка	Оптическая промышленность, приборостроение, турбиностроение
Малые силы резания	Обработка тонкостенных (нежестких) деталей	Авиационная, космическая, автомобильная промышленность, бытовое машиностроение (производство стиральных машин, пылесосов и т.д.)
Высокие частоты возникающих в зоне резания колебаний	Обработка труднообрабатываемых материалов без вибраций	Приборостроение и оптическая промышленность
Практически полный отвод теплоты в стружку	Низкие температуры в зоне резания; отсутствие тепловых деформаций	Обработка деталей из магневых сплавов Прецизионное приборостроение

Скорость резания при HSC оказывает весьма существенное влияние на процесс формирования стружки, поскольку эласто-пластические свойства материала зависят от времени действия и температуры. При относительно низких скоростях резания вся зона первичных пластических деформаций находится в практически равных условиях. По мере роста скорости возрастает уровень температуры и ее градиент, снижая эффект упрочнения обрабатываемого материала. При сверхвысоких скоростях могут возникнуть адиабатические условия протекания процессов деформации [3, 4]. При достижении баланса между эффектами упрочнения и разупрочнения образуется стружка в виде отдельных сегментов (рис. 2).

Зона первичных пластических деформаций при сверхскоростном резании очень узкая, стружка контактирует с передней поверхностью инструмента на крайне малом участке непосредственно за режущей кромкой. Подтверждением служит возрастание уровня нормальных контактных напряжений на передней поверхности по мере роста скорости резания, тогда как при обычном резании они снижаются.

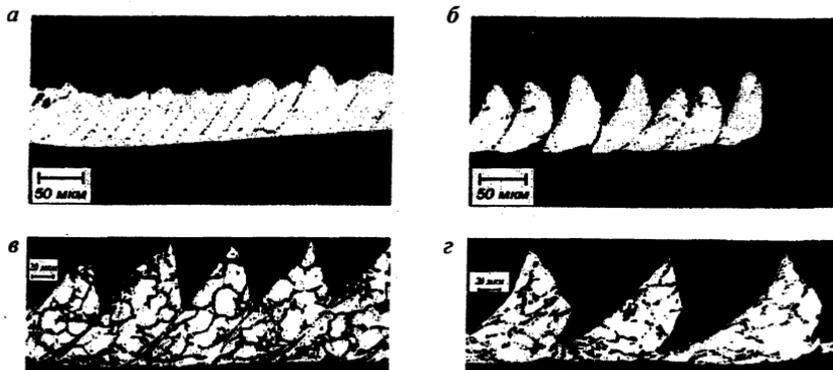


Рис. 2. Стружки, полученные при сверхскоростном резании:

*a* – алюминиевого сплава AlZnMgCu 1,5,  $v = 1000$  м/мин; *б* – то же,  $v = 7000$  м/мин,  $S_z = 0,2$  мм/зуб [5]; *в* – титанового сплава Ti6Al14V,  $v = 1200$  м/мин; *г* – то же,  $v = 4800$  м/мин;  $a = 0,07$  мм;  $\gamma = 0^\circ$  [6]

Материал образующихся сегментов стружки практически не подвергается деформации, за исключением очень тонкого слоя, соединяющего сегменты между собой. Да и сам этот слой имеет весьма малую степень упрочнения, зато характеризуется появлением микротрещин, предшествующих разделению стружки скалывания на отдельные элементы. Особенно это характерно для материалов, изначально имеющих низкие пластические свойства – титановых сплавов и закаленных сталей.

При достижении температур, близких к температуре плавления, наблюдается разделение сегментов стружки [3]. При резании закаленных сталей в ряде случаев зафиксирована порошкообразная стружка [7].

Коэффициент укорочения стружки при сверхвысоких скоростях для широкого круга обрабатываемых материалов значительно меньше, чем при обычном резании. В ряде случаев он может быть меньше единицы при одновременном уменьшении ширины стружки.

Известно, что действительный угол сдвига  $\Phi$  в традиционных условиях резания значительно меньше угла, обеспечивающего минимальный относительный сдвиг (для сливного стружкообразования  $\Phi_{\rightarrow \min} = 45^\circ$ ). В условиях сверхскоростного резания для различных обрабатываемых материалов угол сдвига колеблется относительно этой теоретической величины [6, 8], а иногда достигает  $60^\circ$  [7]. Такой характер стружкообразования обусловлен особенностями условий трения на передней поверхности, динамических физико-механических свойств обрабатываемого металла и протекания микродеформаций.

Силы и мощность резания. Весьма важную роль в физических процессах в зоне резания при сверхскоростной обработке играют силы инерции. В условиях обычного резания эти силы совершенно незначительны, при сверхскоростном составляют до 30...50 % от  $P_r$ . Для расчетов силы инерции можно воспользоваться формулой [9]:

$$P_{\text{и}} = \frac{\rho v^2 ab \cos \gamma}{\cos(\Phi - \gamma)} = \frac{\rho v^2 S t \cos \gamma}{\cos(\Phi - \gamma)},$$

где  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала;  $v$  – скорость резания;  $a, b$  – толщина и ширина среза;  $S$  – подача;  $t$  – глубина резания;  $\gamma$  – передний угол;  $\Phi$  – угол сдвига.

При точении легированной стали твердосплавным резцом силы равны (табл. 2).

Таблица 2

Влияние скорости резания при точении  
на силы резания и инерции

Скорость резания, м/мин	Сила резания, Н (согласно [10])	Сила инерции, Н
60	1700	7
120	1550	25
180	1460	57
300	1350	158
600	1200	700
1200	1100	2860
3000	960	20600
6000	870	89300

Предварительные расчеты показывают, что приращение энергии под действием этих сил составляет около 10% от общей энергии резания при скоростях 10000 м/мин и практически равно этой мощности при 30000 м/мин [1].

Для более прочных материалов минимум силы резания будет смещаться в зону более высоких скоростей [11], поскольку в этом случае выше уровень сил резания и инерционная составляющая начинает сказываться при более высоких скоростях.

Удельные силы резания по мере роста скорости резания снижаются, хотя в целом их уровень выше по сравнению с традиционным резанием. Минимальные значения сил наблюдаются при максимальных подачах и скоростях резания, что подтверждает эффект охрупчивания обрабатываемого материала в условиях HSC. Снижение удельных сил резания снижает рост мощности резания, хотя в целом она весьма значительна. По данным фирмы «Локхид» (США), при обработке стали 45 при  $t=5$  мм,  $S=0,3$  мм/об,  $v=120$  м/мин мощность резания равна 6,47 кВт, а при  $v=10\ 000$  м/мин – 161 кВт [7].

**Температура резания.** При сверхскоростном резании, начиная с критического значения  $v_{кр}$ , возможно снижение температуры. Это объясняется тем, что отделение срезаемого слоя происходит в результате не пластического, а хрупкого разрушения. Наблюдается локализация пластических деформаций в малых объемах и интенсивный разогрев контактных слоев, приводящий к снижению сил трения. Например, температура стружки при фрезеровании алюминиевого сплава со скоростью резания 4700 м/мин, глубиной 3 мм и подачами менее 1500 мм/мин. достигает температуры плавления металла. Эта стружка обладает таким запасом энергии, что сразу же после возникновения приваривается к поверхности детали или сплавляется с ней. Если же подача превышает 2500...3000 мм/мин, температура заготовки поднимается только на 6 °С выше комнатной, и теплота, возникающая в процессе резания, отводится вместе со стружкой, температура которой не превышает 240 °С [12]. Однако условия теплоотвода могут меняться, и тогда температура стружки остается чрезвычайно высокой (рис. 3).

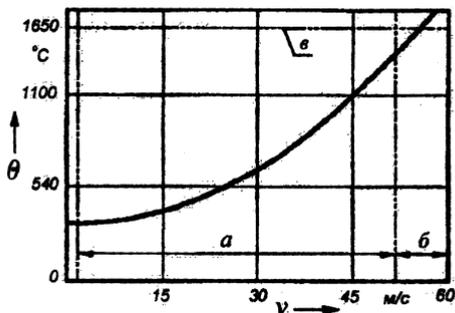


Рис. 3. Изменение температуры стружки при сверхскоростном резании хромо-молибденовой стали AISI 4340: *а* — зона оплавления поверхностных слоев стружки; *б* — зона полного оплавления стружки; *в* — температура плавления стали [13]

Температура режущей части инструмента возрастает с ростом скорости резания, хотя и в значительно меньшей степени. В ряде случаев высока также температура на поверхности детали. Так, при сверхскоростном точении закаленных сталей зафиксировано появление «белого слоя» в поверхностных слоях детали, который свидетельствует о чрезвычайно высоких деформациях и о возможных фазовых превращениях.

**Изнашивание и стойкость инструмента.** Специфика механизма изнашивания инструмента связана с высокими температурами на площадках контакта и малым временем контактирования. Отсутствие нароста и застойной зоны и упрочнение металла в зоне пластического контакта повышает интенсивность адгезионных и диффузионных процессов, возникает значительный износ контактных площадок вблизи режущей кромки. Динамика и интенсивность изнашивания при обычных и сверхвысоких (больших в 300 раз) скоростях при прочих равных условиях может быть примерно одинаковой или несколько более высокой в последнем случае [1, 14]. Зависимости

$T = f(v, S)$  могут иметь перегиб, положение которого определяется свойствами обрабатываемого материала и условиями обработки.

Для обеспечения высокой стойкости режущие инструменты оснащаются сменными пластинами из твердых сплавов с многослойными покрытиями из минералокерамики и сверхтвердых материалов. Для уменьшения дисбаланса корпуса вращающихся инструментов выполняются из легких сплавов [15].

При сверхскоростной обработке в значительной степени изменяются подходы к использованию СОЖ. Исследования показывают, что в таких условиях более эффективно резание всухую либо с подводом газовой среды.

**Производительность обработки.** Производительность обработки, как известно, определяется соотношением между уровнями скоростей резания, подачи и периода стойкости инструмента. Исследования показывают что при сверхскоростной обработке наибольший съем металла при постоянной стойкости и минимальный относительный объемный износ обеспечиваются при значительных подачах и меньшей скорости резания.

В связи с резким возрастанием уровня скоростей резания реальная производительность обработки чрезвычайно велика; при равной точности она может быть в 1,5...4 раза выше, чем у шлифования. На практике используются станки, обеспечивающие съемы металла в минуту до 4000 см<sup>3</sup> или до 25...30 кг [7]. Баллистическое резание позволяет повысить съем до 100000 см<sup>3</sup>/мин [9] и даже до 950 000 см<sup>3</sup>/мин [12].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Schulz H., Moriwaki T. High Speed Machining// Annals of CIRP. – 1992. – Vol. 41. – № 2. – P. 637–643.
2. Schulz H., Spur G. Aspects in Cutting Mechanism in High Speed Cutting// Annals of CIRP. – 1989. – Vol. 38. – № 1. – P. 51–54.
3. R.Ippolito, R.Tornincasa, R.Levi. High Speed Machining: Tool Performance and Surface Finish in Steel Turning// Annals of CIRP. – 1988. – Vol. 37. – № 1. – P. 105–108.
4. Toenshoff H.K., Winkler H., Patzke M. Chip Formation at High Cutting Speeds// ASME PED. – 1984. – Vol. 12. – P. 95–104.
5. Schulz H., Abele E., Sahm A. Material Aspects of Chip Formation in HSC Machining// Annals of CIRP. – 2001. – Vol. 50. – № 1. – P. 45–48.
6. Gente A., Hoffmeister H.-W. Chip Formation in Machining Ti6Al14V at Extremely High Cutting Speeds// Annals of CIRP. – 2001. – Vol. 50. – № 1. – P. 49–52.
7. Потапов А.А., Айзеншток Г.И. Высокоскоростная обработка. М.: ВНИИТЭМП, 1986. – 53 с.
8. Poulachon G., Moisan A. A Contribution to the Study of the Cutting Mechanisms During High Speed Machining of Hardened Steel// Annals of CIRP. – 1998. – Vol. 47. – № 1. – P. 73–76.
9. Kronenberg M. Gedanken zur Theoretic und Praxis der Ultra-Schnellzerspannung// Tech. Zbl. Prakt. Metallbear. – 1961.- Bd. 55. – №. 8. – S. 443–446.
10. Справочник

технолога-машиностроителя: В 2 т. – Т. 2 / Под ред. А.Г.Косиловой и Р.К.Мещерякова.– М.: Машиностроение, 1986. – 496 с. 11. Полосаткин Г.Д., Караева В.Л. Резание металлов со сверхвысокими скоростями// Обрабатываемость жаропрочных и титановых сплавов. – Куйбышев, 1962.- С. 95–103. 12. Scherer J. Zerspanen von Aluminium bei hohen Schnittgeschwindigkeiten// Werkstatt und Betrieb. – 1984. – Bd. 117. – № 7. – S. 355–358. 13. Flom D.G. Komanduri R. High-speed machining. Metal Handbook, vol. 16, Machining. ASM International, 1989.- S. 597–506. 14. Kronenberg M. Zweiter Bericht über Vervielfachung heute üblicher Schnittgeschwindigkeiten// Werkstattechnik. – 1961.- Bd. 51. – № 3. –S. 133–141. 15. Schulz H. Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. High-Speed Machining. München – Wien: Carl Hanser Verlag, 1996. –286 s.

УДК 621.921.924

А.С.Фирсов, В.С.Мисевич

## **ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧКИ КАСАНИЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ ФАСОННЫХ ИНСТРУМЕНТОВ И ДЕТАЛЕЙ**

*Витебский государственный технологический университет  
Витебск, Беларусь*

При формообразовании шлифованием бесстружечных трех- и четырехвалковых метчиков [1], других подобных инструментов, а также кулачков — возникает необходимость определения зависимости между перемещением оси шлифовального круга в зависимости и углом поворота изделия. Эту задачу можно решать с применением метода четырехмерных матриц [2], который обладает наибольшей общностью и формализмом, но не определяет координат точки контакта инструмента и изделия. Необходимо разработать метод решения этой задачи, общий для подобных изделий промышленности.

Так как профиль изделия в большинстве случаев задается координатами отдельных точек, то отыскание точек касания аналитическими методами невозможно. Для этой задачи наиболее удобны численные методы. Отыскание точки касания в численном виде может производиться двумя методами:

1) методом замены касательных секущими;

2) методом вспомогательных линий, параллельных оси координат, по которой производится формообразующее перемещение органа станка. При этом вспомогательные линии проходят через точки, задающие профиль изделия.