

УДК 621.9.01.001.572

**В.А. ЗАЛОГА**, д-р техн. наук,  
**Д.В. КРИВОРУЧКО**, д-р техн. наук,  
**Л.В. ГОЛОБОРОДЬКО**,  
**С.С. НЕКРАСОВ**, канд. техн. наук,  
**М.О. ЗДЕЛЬНИК**, Сумы, Україна

### **МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ОБРАЗОВАНИЕМ СТРУЖКИ ПРИ МИКРОРЕЗАНИИ С ПОМОЩЬЮ РАСТРОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА**

У статті запропоновано методику спостереження за процесом стружкоутворення при різанні з товщинами зрізу порівнянними з радіусом округлення різальної кромки за допомогою растрового електронного мікроскопу, показана можливість отримання покрокових фотографій процесу стружкоутворення при різанні з малою товщиною зрізуваного шару, встановлено характер зміни і форма стружки, також виміряна товщина шару, що зрізується, величина зони контакту стружки з передньою поверхнею різця і коефіцієнт усадки стружки.

В статье предложена методика наблюдения за процессом стружкообразования при резании с толщинами среза соизмеримыми с радиусом округления режущей кромки с помощью растрового электронного микроскопа, показана возможность получения пошаговых фотографий процесса стружкообразования при резании с малой толщиной срезаемого слоя, установлено характер изменения и форма стружки и измерена толщина срезаемого слоя, величина зоны контакта стружки с передней поверхностью резца и коэффициент усадки стружки.

Proposed a method for monitoring the process of chip formation in cutting a slice thickness commensurate with the radius of rounding the cutting edge with the aid of a scanning electron microscope, shows the possibility of chip formation process step by step photos of the cutting with a thin layer cut, set to change the nature and form of chips and measured the thickness of the shear layer, the magnitude of the contact area with the front surface of the chip and cutter shavings shrinkage ratio in the paper.

Необходимость создания точных приборов, компьютерной техники, роботов и других точных устройств требует изготовления деталей с

---

© В.А. Залого, Д.В. Криворучко, Л.В. Голобородько, С.С. Некрасов,  
М.О. Здельник, 2013

высокой точностью. С развитием станкостроения становится возможным замена процессов шлифования на процессы резания лезвийным инструментом, что позволяет повысить производительность обработки, сформировать благоприятные остаточные напряжения в обработанной поверхности, получить детали с такой конфигурацией, которую шлифованием выполнить не возможно. В этой связи практические исследования механики микрорезания лезвийным инструментом становятся актуальными.

Изучение влияния различных факторов (переднего и заднего углов, радиуса округления режущей кромки, фаски износа по задней поверхности, скорости резания и глубины) на процесс стружкообразования при микрорезании позволит установить наиболее благоприятные условия резания, оценить величину деформаций в зоне стружкообразования и прочность режущего лезвия.

Впервые экспериментальные исследования процесса микрорезания провели Т. Mori waki и К. Okuda. Они исследовали фундаментальные аспекты процесса микрообработки, в том числе процесс стружкообразования, ориентацию кристаллов, расположение и структуру зерен, находящихся на кромках инструмента, режущую кромку инструмента, силу резания, и провели ультраточную (прецизионную) обработку медной заготовки алмазным инструментом с глубиной резания от 2,5 нм до 3 мкм [1, 2].

Процессы микрорезания связаны с удалением с поверхности заготовки обрабатываемого материала толщиной в несколько атомов или атомных слоев. Как правило, при микрорезании заострение режущей кромки очень малы, а глубина резания таким инструментом находится в субмикронном диапазоне, что приводит к значительным трудностям за наблюдением процесса стружкообразования.

Толщина резания в процессе микрорезания соизмерима с радиусом округления режущей кромки. Установившееся стружкообразование наступает при любом  $a/\rho$ , однако при малых  $a/\rho$  усадка стремится к  $\infty$ , и скорость стружки будет настолько малой (в 10 и более раз меньше скорости резания), что она не будет выглядеть стружкой в привычном понимании этого слова. Стружку привычного вида можно наблюдать лишь

при толщине среза, обеспечивающей стружкообразование по всей длине контролируемого участка режущей кромки с примерно равной усадкой. Этим объясняются сложности регистрации стружки при очень малой толщине среза и большим значением радиуса округления. Минимальная толщина среза, позволяющая реализовать процесс резания в выгодных условиях при достаточной жесткости технологической системы, находится в пределах  $a = (0.2 \div 0.4)\rho_0$  [3, 4, 5, 6, 7].

**Целью** данной работы является разработка методики наблюдения за процессом стружкообразования при микрорезании с толщинами среза менее 100 мкм.

Образование стружки при резании можно наблюдать с помощью разных методов: металлографическим методом, с помощью высокоскоростной камеры, с помощью растрового микроскопа, с помощью оптического микроскопа [8, 9, 10].

При высокоскоростной съемке с малыми толщинами среза получаемые данные значительно завышены и позволяют оценить лишь тенденции изменения участка контакта в цикле резания. Это может быть вызвано визуальной неопределенностью при данных технических возможностях.

Металлографический и оптический методы предполагают получения корней стружки. Полученный с помощью приспособления для «мгновенного» прекращения резания корень стружки вырезают, тщательно полируют его боковую сторону, а затем протравливают соответствующим реактивом. Полученный микрошлиф корня стружки рассматривают под микроскопом при увеличении в 25–200 раз или делают микрофотографию. Изменение структуры стружки и зоны деформации по сравнению со структурой недеформированного материала, направление текстуры деформации позволяют установить границы зоны деформации и судить о деформационных процессах, в ней происходивших.

Альтернативой применению оптических микроскопов для измерения формы и величины радиуса округления ( $\rho_0$ ) режущей кромки и исследования процесса стружкообразования является использование растрового электронного микроскопа, который обладает большей глубиной резкости и позволяет зафиксировать изменения, происходящие

во время стружкообразования при микрорезании в том числе и по толщине стружки.

Универсальный растровый электронный микроскоп РЭМ-100УМ предназначен для всестороннего исследования поверхности различных твердых тел с предельной разрешающей способностью во вторичных электронах (без дополнительных устройств) не более 10 нм.

Принцип наблюдения в этом микроскопе основан на облучении исследуемого образца сфокусированным пучком электронов с минимальным диаметром около 10 нм, что соответствует предельному разрешению этого способа наблюдения [3].

Для реализации процесса резания необходимо усовершенствование конструкции предметного столика электронного микроскопа, в котором было бы возможно осуществлять контролируемое перемещение резца относительно заготовки с заданной глубиной резания на заданное расстояние вдоль заготовки, что позволит наблюдать процесс стружкообразования при малых толщинах среза. Разработанная конструкция столика представлена на рис. 1.

Заготовка жестко фиксируется в столике при помощи двух винтов. Перемещение резца обеспечивается путем вращения вручную специального винта с мелкой резьбой, который обеспечивает перемещение на заданную величину резца через пластину. Пластина установлена на направляющих, которые позволяют перемещаться пластине только в одном направлении вдоль оси специального винта. Задание глубины резания обеспечивается регулировочными винтами, которые перемещают подкладную пластину.

В ходе исследования был проведен поисковый эксперимент с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ-100У, который обеспечивает большую точность измерений на больших увеличениях, что не может обеспечить оптический микроскоп.

В ходе поискового эксперимента рассматривалось прямоугольное свободное резание алюминиевого сплава Д16 резцом из быстрорежущей стали Р6М5, передний угол составлял  $20^\circ$ , задний  $10^\circ$ . Заготовка была жестко закреплена на предметном столике микроскопа. Главное движение резания  $D_f$  обеспечивалось путем перемещения резца в ручную вдоль

заготовки, а, следовательно, обеспечивались низкие скорости резания. Толщина срезаемого слоя  $a$  составила 0,06мм (рис. 2). Проводилось сухое резание в вакууме.

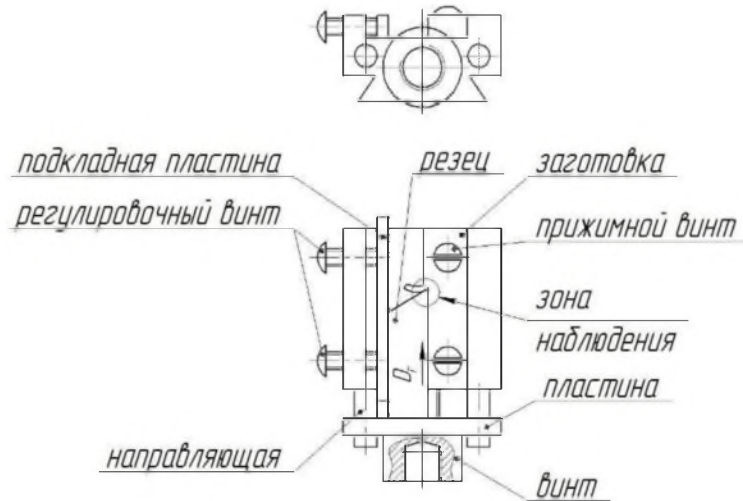


Рисунок 1 – Приспособление для исследования процесса микрорезания

При резании металлов на воздухе образовывается оксидная пленка на обработанной поверхности, которая оказывает влияние на величину усадки стружки [11]. Вместе с тем как отмечают [12, 13] в зоне резания контактируют химически чистые поверхности режущего инструмента и обрабатываемого материала, следовательно, условия резания, с точки зрения контактных взаимодействий, в условиях вакуума и воздуха будут одинаковы. В то же время в вакууме ухудшается теплоотвод, следовательно, возрастают температуры резания, т.к. нет отвода тепла в окружающую среду, что в свою очередь увеличивает интенсивность износа режущего инструмента.

Характерной особенностью для процесса микрорезания являются малые толщины срезаемого слоя и скорости резания. Известно, что при уменьшении толщины среза коэффициент усадки стружки увеличивается, что связано с изменением среднего коэффициента трения. При резании в воздушной среде скорость резания является одним из наиболее влияющих на образование стружки факторов: при увеличении скорости резания происходит увеличение температуры в зоне резания, и лишь при таких скоростях резания, когда температура в зоне резания превышает  $600^{\circ}\text{C}$ ,

увеличение скорости способствует улучшению процесса резания. Вместе с тем при низких скоростях резания возрастают силы резания.

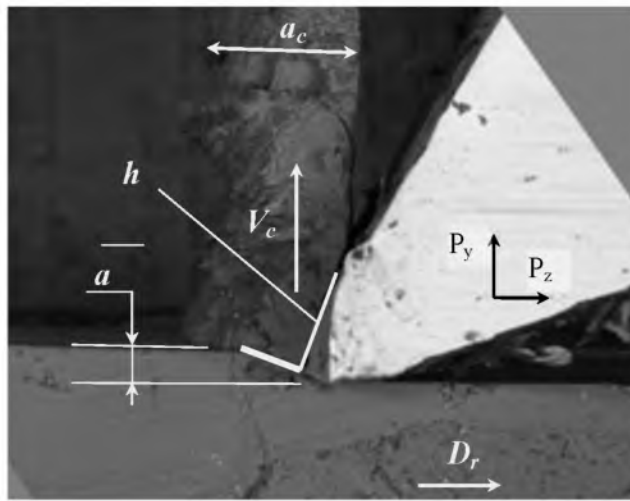


Рисунок 2 – Фотография процесса микрорезания при  $V=0.1$  мм/мин,  $a=0,06$  мм

Изучение стружек, полученных в процессе резания, показывает, что характер стружкообразования, внешний вид, структура стружек аналогичны стружке, полученной при проведении исследований по обработке алюминия (рис. 3) [14, 15, 16].

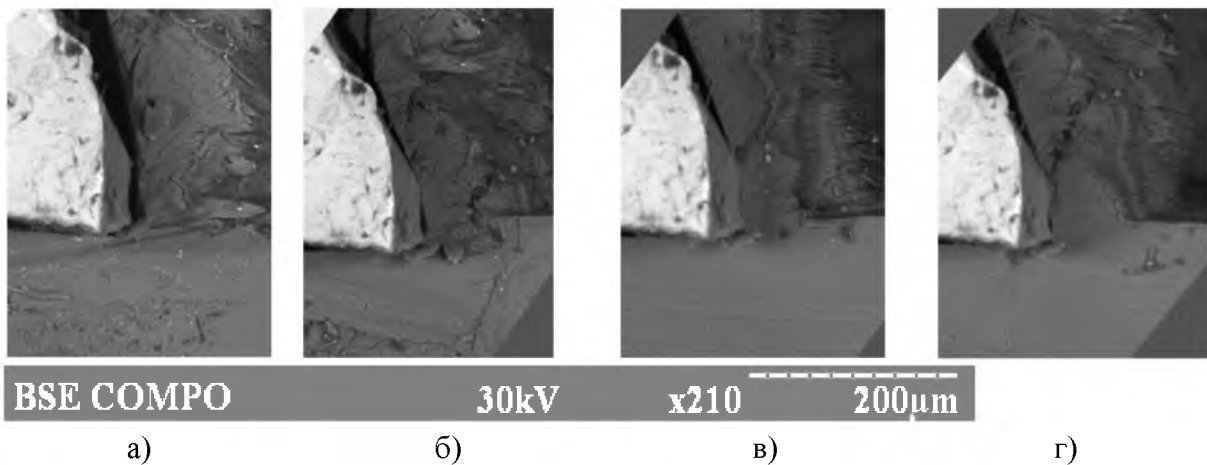


Рисунок 3 – Образование стружки в ходе эксперимента

В ходе проведения эксперимента наблюдалось образование сливной стружки. Проведенное исследование позволило установить величину коэффициента усадки стружки, которая составила 5,8 – 6,1. Также была

измерена величина зоны контакта стружки  $h$  с передней поверхностью резца, которая составила 65 мкм.

Проведенный эксперимент позволил установить возможность изучения процесса микрорезания с использованием электронного микроскопа, следовательно, возможно изучение влияния формы режущей кромки на показатели процесса микрорезания, такие как усадка стружки, величина зоны контакта, положение условной плоскости сдвига. Результаты исследований, проведенных в вакууме, можно перенести на реальные процессы, т.к. атмосфера оказывает действие только на поверхности инструмента и заготовки, которые не находятся в контакте. Также ухудшение теплоотвода и увеличения сил резания приводят к ухудшению условий работы инструмента, следовательно, при резании в вакууме создаются худшие условия, нежели на воздухе. Таким образом, при резании в вакууме мы получаем худший результат резания по сравнению с резанием на воздухе.

#### ВЫВОДЫ

Существуют различные способы наблюдения за процессом стружкообразования: металлографическим методом, с помощью высокоскоростной камеры, с помощью растрового микроскопа, с помощью оптического микроскопа.

Для исследования был использован растровый электронный микроскоп модели РЭМ100УМ. Принцип растрового электронного микроскопа позволяет наблюдать за процессом стружкообразования с увеличением от 40 до 2000 крат с глубиной резкости 0,1мм.

Проведено поисковое исследование и показана возможность получения поэтапных фотографий процесса резания с толщиной срезаемого слоя  $a=0,06$  мм.

Для реализации процесса резания в РЭМ была спроектирована и апробировано приспособление, позволяющее обеспечивать равномерное перемещение образца со скоростью 0,1мм/мин, установлено характер изменения, форму стружки и измерена толщина срезаемого слоя, величина зоны контакта стружки с передней поверхностью резца и коэффициент усадки стружки.

Статья выполнена в рамках научно-исследовательской работы № 51.20.01-02.13/15 «Комплексная разработка интегрированных технологий повышения качества изготовления деталей ответственного назначения путем уменьшения вибраций при разных видах обработки».

**Список использованных источников:** 1. *Moriwaki T.* Machinability of Copper in Ultra-Precision Micro Diamond Cutting/ *T. Moriwaki, Okuda, K.* / – CIRP Annals – Manufacturing Technology. Volume 38, Issue 1, 1989, Pages 115-118. 2. *Iwata, K.* Ultra-High Precision Diamond Cutting of Copper / *Iwata, K., Moriwaki, T., Okuda, K.* / Memoirs of the Faculty of Engineering, Kobe University, 31, 1984. Pages 93-102. 3. *Криворучко Д.В.* Повышение эффективности процессов чистовой обработки на основе аналитического моделирования силового взаимодействия лезвия с заготовкой [Текст]: Дисс. ... канд. техн. наук:05.03.01. – К., 2003. – 205 с. 4. *Родин П. Р.* Металлорежущие инструменты / П. Р. Родин // -М.: Высшая школа, 1973. – 400 с. 5. *Yen Y. C.* Influence of Cutting Edge Radius of Coated Tool on Chip Formation in Orthogonal Cutting of Alloy Steel / *Y. C. Yen, J. Rech, T. Altan, H. Hamdi* //Proceedings of the 7th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. -2004. 6. *Талантов Н. В.* Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / *Н. В. Талантов* // – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с. 7. *Biermann D.* Cutting Edge Preparation to Improve Drilling Tools for HPC Processes / *D. Biermann, I. Terwey* //Proceedings of the 3rd International CIRP High Performance Cutting Conference. -Dublin: University College Dublin, 2008. – С.77-85. 8. Разработка метода контроля процесса токарной обработки / *А. В. Гусев* // Труды I научно-практической конференции студентов и аспирантов НТИ НИЯУ МИФИ (28 октября 2011 г.), – Новоуральск: Изд-во НТИ НИЯУ МИФИ, 2011. – 43с. с ил. – с. 35-41. 9. *S. Ramalingam* An electron microscopy study of chip formation Metallurgical Transactions April 1973, Volume 4, Issue 4, pp 1103-1112 *S. Ramalingam , J. T. Black* 10. *Сединкин, Л.М.* Изучение влияния включений селенидов марганца при механической обработке селеносодержащих сталей [Текст] / *Л.М. Сединкин* // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2004. – №2(61). – С. 140-143. 11. *Якубов Ф.Я.* Роль воздуха в контактных процессах резания металлов/ *Якубов Ф. Я., Ким В. А., Якубов Ч. Ф.* // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Выпуск 27. Технические науки. –Симферополь : НИЦ КИПУ, 2011, стр.5-11. 12. *Шустер Л.Ш.* Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом. - М.: Машиностроение, 1988. 13. *Криворучко, Д. В.* Наукові основи моделювання процесів різання з використанням числових методів: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук:05.03.01/ СумГУ. -Харків, 2010. – 40 с. 14. *Rubio E.M.* Chip arrangement in the dry cutting of aluminium alloys/ *E.M. Rubio, A.M. Camacho, J.M. Sánchez-Sola, M. Marcos*// Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. Volume 16 Issue 1-2 May-June 2006, p.164-170. 15. *V. Songmene* Machining and Machinability of Aluminum Alloys / *V. Songmene, R. Khettabi, I. Zaghbani, J. Kouam, and A. Djebara*// Aluminium Alloys, Theory and Applications Edited by *Prof. Tibor Kvackaj* - Published online 04, February, 2011 – p. 377-400 з // [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com) 16. *I. Popescu* Aluminium cutting specific issues/ *I. Popescu, C. Pascu* // International Conference on Economic Engineering and Manufacturing Systems Braşov, 24-25November 2011, 384-388.