

УДК 621.91.01: 621.763

Особенности процессов стружкообразования и формирования поверхностного слоя детали при обработке газотермических покрытий

Ярославцев В. М.^{1,*}

[*mt13@bmstu.ru](mailto:mt13@bmstu.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрены общие закономерности стружкообразования и формирования свойств поверхностного слоя при резании металлокерамических покрытий, полученных плазменным напылением. Исследования осуществляли на микроскоростях с помощью экспериментальной установки, созданной в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Установлено, что процесс формирования отдельных элементов стружки в целом соответствует представлениям о механизме образования стружки надлома и имеет ярко выраженный циклический характер. Показано, что высокие сжимающие напряжения в наружном слое обработанной поверхности могут вызывать потерю его устойчивости и приводить к образованию сетки микротрещин и локальным разрушениям. При использовании абразивной обработки применение смазочно-охлаждающих жидкостей сопровождается образованием насыщенных паров жидкости под высоким давлением, что также может вызывать локальные разрушения материала.

Ключевые слова: обработка резанием, плазменное напыление, металлокерамические материалы, образование стружки, качество поверхности, локальные разрушения, стружка надлома

Особенности технологии газотермического напыления мелкодисперсных конденсированных частиц материала вызывают слоистое строение и характерную структуру покрытия (наличие пор, прослойки оксидов и др.), специфические физико-механические и химические свойства нанесенного материала, что отражается на всех технологических показателях окончательной механической обработки резанием при изготовлении изделий [1-4]. Вместе с тем, условия формирования поверхностного слоя детали и его качества, обеспечение точности обработки, периода стойкости режущего инструмента и других показателей определяются непосредственно процессом стружкообразования и сопутствующими ему явлениями [3, 5-7].

При резании газотермических покрытий (ГТП) за счет их малой пластичности и высоких остаточных напряжений имеет место стружка надлома. Ниже приводятся результаты исследования характерных стадий процесса образования стружки и разрушения материала в зоне резания, а также влияния условий стружкообразования на особенности фор-

мирования материала поверхностного слоя при обработке ГТП лезвийным режущим инструментом.

Исследования кинетики стружкообразования осуществляли на разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана лабораторной экспериментальной установке [8] для изучения процесса резания материалов на микроскоростях (рис. 1).

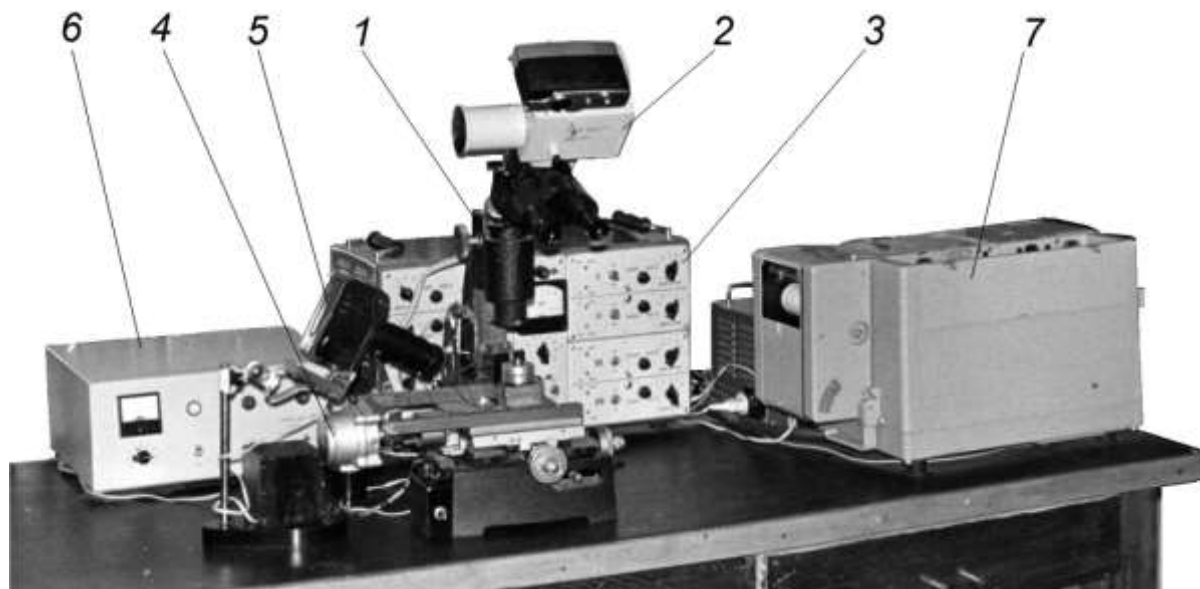


Рис. 1. Общий вид установки для изучения процесса резания (УИПР-1) 1 – микроскоп ТМ 123; 2 – микрофотонасадка МНФЭ-1; 3 – тензометрическая станция 8АНЧ-7М; 4 – привод движения резания; 5 – осветительное устройство; 6 – пульт управления фотонасадкой; 7 – осциллограф Н-700

Установка УИПР-1 смонтирована на базе инструментального микроскопа 1 (см. рис. 1) и дополнительно включает в себя следующие основные конструктивные элементы: оптическую систему с устройством для микрофотографирования 2, тензометрическую станцию 3, механизм для осуществления процесса резания 4, осветительное устройство 5 и осциллограф 7. На мерительном столике микроскопа размещается дополнительный подвижный стол-салазки [8], ходовой винт которого приводится в движение от вала электродвигателя типа СД-64, смонтированного на специальном силовом кронштейне. На салазках устанавливается образец (заготовка) исследуемого материала. Электродвигатель СД-64 осуществляет движение резания со скоростью $5 \cdot 10^{-5}$ м/с (50 мкм/с). На основании микроскопа жестко фиксируется тензометрическое устройство с наклеенными датчиками для измерения главной (P_z) и радиальной (P_y) составляющих силы резания. Режущий инструмент закрепляется непосредственно на тензометрическом устройстве.

Установка позволяет с помощью микроскопа непосредственно наблюдать отдельные стадии процесса образования стружки, последовательно фиксировать их и регистрировать действующие при этом силовые факторы.

Исследования на малых скоростях резания имеют ряд методических преимуществ [9], в частности: отсутствие влияния температурно-скоростного фактора, что обеспечивает более наглядную картину процесса стружкообразования, лучше поддающегося изучению; минимальное действие инерционных сил, позволяющее достигать высокую точность измерений при использовании динамометрической аппаратуры; создаются благоприятные условия для наблюдения за процессом стружкообразования с помощью микроскопа и др. Малые скорости резания дают возможность выявить различные фазы процесса образования стружки и диспергирования отдельных ее элементов.

Эксперименты осуществляли по схеме прямоугольного свободного резания на образцах из стали 40Х с покрытиями толщиной 1,5 мм из плазменнонапыленных материалов ZrO_2 и Al_2O_3 . Диаметр образцов вместе с покрытием составлял 40 мм. В качестве режущего инструмента использовали пластины твердого сплава ВК6ОМ со следующими геометрическими параметрами режущей части: $\gamma = 15^\circ$; $\alpha = 6^\circ$; $\lambda = 0^\circ$. Толщина срезаемого слоя изменялась в интервале значений $a = 0,05\text{--}0,45$ мм; ширина срезаемого слоя – $b = 2,5\text{--}5$ мм; скорость резания $v = 5 \cdot 10^{-5}$ м/с.

Опытным путем показано, что процесс формирования отдельных элементов стружки при резании ГТП в целом соответствует представлениям о механизме образования стружки надлома и имеет ярко выраженный циклический характер, но при этом проявляется ряд своих характерных особенностей процесса стружкообразования. На рис. 2 показана типичная зависимость изменения главной составляющей силы резания P_z в процессе образования элемента стружки.

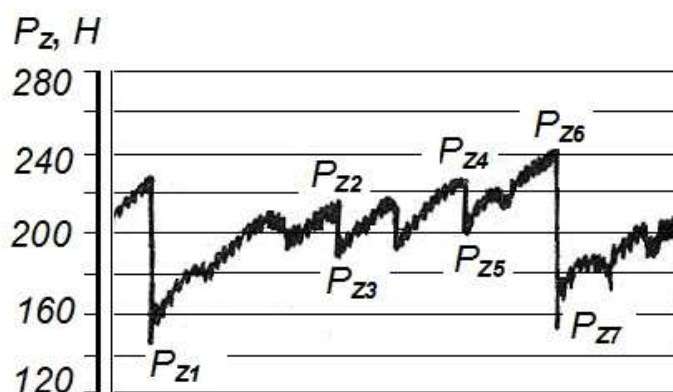


Рис. 2. Характер изменения величины силы P_z при образовании элемента стружки в процессе резания плазменнонапыленной керамики ZrO_2 ($a = 0,15$ мм, $b = 2,5$ мм)

В начальный момент формирования очередного элемента стружки (сила P_{z1} на рис. 2) под силовым воздействием относительно небольшого участка передней поверхности инструмента, примыкающего непосредственно к режущей кромке, в срезаемом слое материала образуется система трещин (рис. 3, а). Дальнейшее относительное перемещение инструмента и заготовки в направлении скорости резания v сопровождается ростом площади контакта по передней поверхности и соответствующим увеличением силы резания до значения P_{z2} , вызывая разрушение и отделение небольшой частицы материала срезаемого

слоя (блок *A* на рис. 3, б), что приводит к некоторому снижению силы (P_{Z3}). Последующее повышение нагрузки на срезаемый слой до значения P_{Z4} создает условия для отделения следующей частицы материала (блок *B* на рис. 3, в) с одновременным падением силы резания до значения P_{Z5} . Продолжающееся относительное перемещение инструмента и заготовки приводит к новому увеличению площадки контакта по передней поверхности и повышению силы резания до величины P_{Z6} . Стадия стружкообразования, соответствующая максимальной площади контакта резца с обрабатываемым материалом, заканчивается появлением в срезаемом слое магистральной трещины (рис. 3, г), выход которой на обрабатываемую поверхность обуславливает отделение наиболее крупного элемента стружки (блок *B*). Одновременно наблюдается падение силы до значения P_{Z7} (см. рис. 2). Далее рассмотренные стадии процесса стружкообразования циклически повторяются.

Установлено, что количество промежуточных отслоений частиц материала за время образования элемента стружки зависит от толщины срезаемого слоя a . Так, при $a = 0,3$ мм под микроскопом можно наблюдать отделение от формирующегося элемента стружки четырех-пяти относительно небольших частиц удаляемого материала. При перемещении режущей кромки инструмента относительно обработанной поверхности заготовки происходит зачистка последней.

В результате стружку образуют отдельные, не связанные друг с другом частички удаляемого материала различной формы и размеров. Кроме того, процесс разрушения сопровождается образованием мелкой металлической пыли.

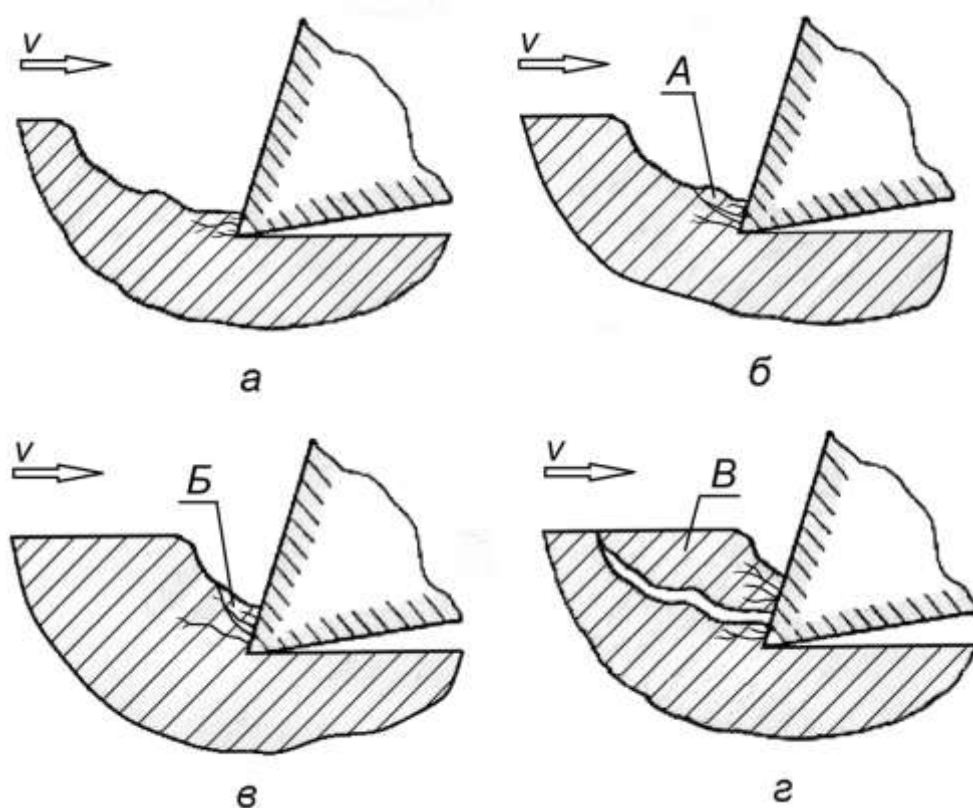


Рис. 3. Схема фаз образования элемента стружки при точении плазменнонапыленной керамики ZrO_2

Таким образом, в каждом законченном цикле процесса стружкообразования можно выделить несколько фаз (см. рис. 2, 3), определяющих конкретные стадии образования отдельного элемента стружки. Вместе с тем, изменения величины силы резания в каждом новом цикле не повторяет полностью колебания нагрузки в предыдущих циклах, т.е. сопротивление резанию является выраженным стохастическим процессом. Изменение радиальной составляющей силы резания P_Y при образовании элемента стружки аналогично характеру изменения P_Z и отличается лишь числовыми значениями.

При проведении исследований было установлено, что характер образования и развития магистральной трещины зависит от толщины срезаемого слоя. При увеличении толщины срезаемого слоя $a > 0,2-0,25$ мм исходная трещина, возникающая у вершины резца, развивается в материале ниже линии среза, как это показано на рис. 4, а. По мере нарастания нагрузки от этой трещины ответвляется новая, которая выходит на поверхность и обуславливает отделение крупного элемента стружки (см. рис. 4, б).

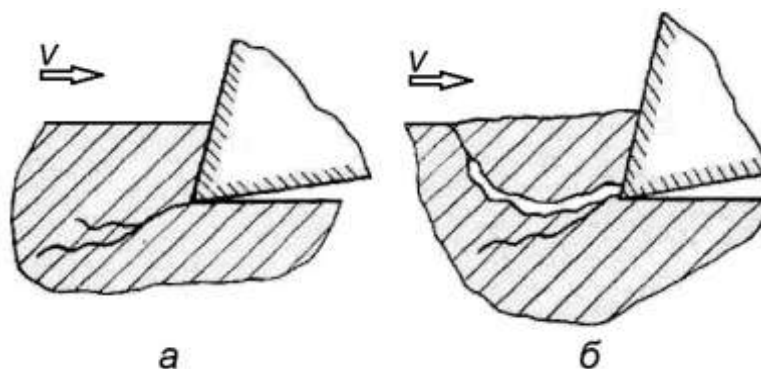


Рис. 4. Схема отделения элемента стружки при точении плазменнонапыленной керамики ZrO_2 при повышенных толщинах срезаемого слоя

Развитие трещины ниже линии среза приводит к периодическому нарушению контакта между режущим инструментом и обрабатываемым материалом, сопровождаясь падением силы резания до нулевых значений.

Рассмотренный механизм отделения элементов стружки способствует возникновению на обработанной поверхности микротрещин, раковин, сколов и других дефектов, значительно снижающих эксплуатационные характеристики изделия. При дальнейшем увеличении толщины срезаемого слоя ($a \geq 0,4$ мм) имели место отдельные случаи разрушения плазменного покрытия на всю его толщину.

Процессы и явления, происходящие в зоне стружкообразования при резании ГТП, характеризуются высокой динамичностью: разрушение в срезаемом слое материала и образование элементов стружки, вызванные циклически повторяющимися периодами накопления упругой энергии под действием режущего инструмента, носят лавинный, взрывной характер [10]. Большое влияние на динамику разрушения и характеристики поля напряжений в зоне резания оказывают внутренние остаточные напряжения в материале по-

крытия, образующиеся как результат технологии нанесения покрытия газотермическим напылением [1].

Условия стружкообразования и особенности строения, физико-механические свойства газотермических покрытий отражаются и на характере формирования обработанной резанием поверхности, состояние которой определяет качество детали и ее служебные характеристики [11, 12].

Экспериментальными исследованиями установлена высокая склонность газотермических покрытий к упрочнению, перенаклепу от воздействия режущего инструмента [1, 3]: контактные давления при резании вызывают в сравнительно тонком поверхностном слое материала высокие остаточные сжимающие напряжения. Величина и степень локализации напряжений дополнительно возрастают в результате теплового расширения поверхности со значительным градиентом температуры резания, обусловленным пониженной теплопроводностью покрытий [1, 5].

Явления, возникающие при обработке резанием в поверхностном слое покрытия, существенным образом изменяют его состояние [13]. Так, повышение напряженности процесса резания (контактных давлений, температур и др.) может вызывать локальные разрушения поверхности: отслаивание, выкрашивание, шелушение (появление чешуек обрабатываемого материала). Существует представление [14], что физическая природа данного явления связана с потерей устойчивости упругого или упругопластического состояния равновесия поверхностного слоя детали, который в общем случае можно представить в виде гибких стержней, пластин или оболочек, испытывающих действие равномерно распределенной сжимающей нагрузки и скрепленных с упругой полуплоскостью (расположенной ниже материалом покрытия).

При механической обработке плоской поверхности разрушение ее наступает в случае увеличения осевой нагрузки до критических значений, приводящих к потере плоской формы осевого равновесия (образованию гофра).

Обработка криволинейных участков поверхностей, например, обтачивание цилиндра, соответствует схеме нагружения полосы с круговой осью. Критическая сжимающая нагрузка и в этом случае приводит к потере упругой устойчивости и разрушению поверхностного слоя. Причем как показывают экспериментальные исследования с увеличением кривизны обрабатываемой поверхности (например, уменьшением радиуса цилиндрической заготовки) склонность поверхностного слоя к разрушению (выкрашиванию, шелушению, отслаиванию) повышается. Так, при обтачивании цилиндрической заготовки с газотермическим покрытием Al_2O_3 ($v = 0,67$ м/с; $S = 0,125$ мм/об; $t = 0,3$ мм) радиусом $R = 27$ мм достигается высокое качество обработанной поверхности. Аналогичное покрытие заготовки $R = 17$ мм, полученное при эквивалентных режимах плазменного напыления и резания, после механической обработки обнаруживает следы шелушения поверхностного слоя и микротрещины.

Одним из эффективных средств снижения теплонапряженности процесса резания и повышения периода стойкости инструмента является применение смазочно-охлаждающих

жидкостей (СОЖ) [15-17]. Однако при обработке газотермических покрытий резанием, особенно на операциях шлифования, применение СОЖ может быть сопряжено со значительными трудностями, связанными с интенсификацией процесса разрушения поверхностного слоя, физический механизм которого непосредственно связан с пористостью ГТП [1, 3]. Смазочно-охлаждающая жидкость в зоне резания заполняет поры, микротрещины и микронеровности обрабатываемого материала. Действующие в зоне стружкообразования высокие температуры вызывают закипание СОЖ. На участках контакта режущего инструмента с обрабатываемым материалом и стружкой происходит образование насыщенных паров жидкости с давлением, соответствующим высокому контактному давлению режущего инструмента на обрабатываемый материал (до 1 ГПа и выше). Перемещение инструмента в направлении скорости резания сопровождается разгрузкой участка обработанной поверхности, вышедшего из контакта с инструментом, и давление на образовавшуюся поверхность резко падает, что мгновенно приводит к взрывообразному вскипанию перегретой жидкости за счет запасенного тепла. Парообразование идет с такой интенсивностью [18], что дросселирование паров жидкости через микропоры материала создает в поверхностном слое большие внутренние растягивающие напряжения. Малая пластичность газотермических покрытий и относительно низкое сопротивление материала покрытий действию растягивающих напряжений создают условия, которые могут вызывать образование сетки микротрещин и хрупкое разрушение в поверхностном слое на глубину его пропитки СОЖ.

При более высоких температурах нагрева (выше критической для используемой СОЖ) все пространство в порах и микротрещинах будет занимать пар под высоким давлением. После падения внешнего давления резания перегретый пар, расширяясь, создает в поверхностном слое материала поле растягивающих напряжений, которое, как и в предыдущем случае, может инициировать разрушения.

Аналогичное действие СОЖ проявляется и непосредственно в зоне стружкообразования. Явления парообразования и дросселирования паров СОЖ способствуют разрушению материала срезаемого слоя и диспергированию (измельчению) элементов стружки на мелкие частицы.

Таким образом, обеспечение необходимых параметров точности обработки и качества поверхностного слоя может достигаться путем целенаправленного управления термомеханическими условиями в зоне резания, правильным выбором условий обработки и техники подачи СОЖ с учетом особенностей процесса стружкообразования при резании газотермических покрытий.

Список литературы

1. Газотермическое напыление: учеб. пособие / под общей ред. Л.Х. Балдаева. 2-е изд. М.: ООО "Старая Басманная", 2015. 540 с.
2. Кравченко И.Н., Карелина М.Ю., Зубрилина Е.М., Коломейченко А.А. Ресурсосберегающие технологии получения функциональных наноструктурированных покрытий

- высокоскоростными методами нанесения // Вестник Донского государственного технического университета. 2015. Т. 15. № 3 (82). С. 19–27.
3. Ярославцев В.М. Обработка газотермических покрытий резанием. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 89 с.
 4. Клименко С. А., Мельничук Ю. А., Встовский Г. В. Взаимосвязь параметров структуры, механических свойств напыленных материалов и стойкости инструмента при их обработке резанием // Сверхтвердые материалы. 2008. № 2. С. 56–64.
 5. Лебедев В.Г., Чумаченко Т.В. Экспериментальное исследование формирования шероховатости поверхности напыленного керамического слоя на шейках валов ротора газовой турбины // Проблемы машиностроения. 2013. Т. 16. № 5. С. 3–6.
 6. Ярославцев В.М., Сабельников В.В., Гусенко А.Ю. Исследование процесса стружкообразования при точении плазменнонапыленных металлокерамик // Теория и практика газотермического нанесения покрытий. Дмитров, 1985. С. 230–233.
 7. Ярославцев В.М. Процесс образования стружки при резании полимерных композиционных материалов с волокнистыми наполнителями // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. 2012. №2. С. 81–87.
 8. Ярославцев В. М., Гусенко А.Ю. Установка для изучения процесса резания материалов на малых скоростях резания // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 3. С. 77–84. DOI: [10.7463/0313.0541420](https://doi.org/10.7463/0313.0541420)
 9. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956. 368 с.
 10. Ярославцев В.М. Новое о процессе резания // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение, 2000. №4. С. 32–46.
 11. Ярославцев В.М., Ярославцева Н.А. Общий подход к оценке параметров качества изделия при восстановлении // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 5. С. 18–28. DOI: [10.7463/0512.0361862](https://doi.org/10.7463/0512.0361862)
 12. Ярославцев В.М., Ярославцева Н.А. Прогнозирование надежности реновируемых деталей машин на основе анализа структуры технологии восстановления // Методы менеджмента качества. 1999. №8. С. 52–58.
 13. Ярославцев В.М. Технологический процесс – энергетический преобразователь // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 7. С. 21–32. DOI: [10.7463/0712.0414854](https://doi.org/10.7463/0712.0414854)
 14. Эрлих Л.Б., Кособудский В.А., Вершин Л.И. Волнообразование на обкатываемых поверхностях. М.: Наука, 1973. 51 с.
 15. Худобин Л.В. Смазочно-охлаждающие технологические средства. Справочник. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.
 16. Пилипенко А. М., Коробка В. Ф., Немец В. М. Абразивное шлифование деталей цилиндрической формы после плазменного покрытия // Сверхтвердые материалы. 1981. № 5. С. 62–65.

17. Майоров В.А. Течение и теплообмен однофазного охладителя в пористых металлокерамических материалах // Теплоэнергетика. 1978. № 1. С. 64–70.
18. Павлов П.А. Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей. Свердловск: УрО АН СССР, 1988. 248 с.

Specific Features of Chip Making and Work-piece Surface Layer Formation in Machining Thermal Coatings

V.M. Yaroslavtsev^{1,*}

^{*}mt13@bmstu.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: machining, plasma spraying, metal-ceramic materials, chip formation, surface quality, local fracture, chip fracture

A wide range of unique engineering structural and performance properties inherent in metallic composites characterizes wear- and erosion-resistant high-temperature coatings made by thermal spraying methods. This allows their use both in manufacturing processes to enhance the wear strength of products, which have to operate under the cyclic loading, high contact pressures, corrosion and high temperatures and in product renewal.

Thermal coatings contribute to the qualitative improvement of the technical level of production and product restoration using the ceramic composite materials. However, the possibility to have a significantly increased product performance, reduce their factory labour hours and materials/output ratio in manufacturing and restoration is largely dependent on the degree of the surface layer quality of products at their finishing stage, which is usually provided by different kinds of machining.

When machining the plasma-sprayed thermal coatings, a removing process of the cut-off layer material is determined by its distinctive features such as a layered structure, high internal stresses, low ductility material, high tendency to the surface layer strengthening and re-hardening, porosity, high abrasive properties, etc. When coatings are machined these coating properties result in specific characteristics of chip formation and conditions for formation of the billet surface layer.

The chip formation of plasma-sprayed coatings was studied at micro-velocities using an experimental tool-setting microscope-based setup, created in BMSTU. The setup allowed simultaneous recording both the individual stages (phases) of the chip formation process and the operating force factors.

It is found that formation of individual chip elements comes with the multiple micro-cracks that cause chipping-off the small particles of material. The emerging main crack in the cut-off layer of material leads to separation of the largest chip element. Then all the stages of chip element formation are cycled. Fluctuations of the cutting force components completely repeat all the stages of local destruction and formation of individual chip elements. Studies have shown

that with increased thickness of the cut-off layer the main crack develops below the cut-off line thus significantly affecting the quality of the machined surface: emerging cracks, cavities, chips, and other defects that significantly reduce the product performance.

In machining the plasma-sprayed coatings, their high tendency to strengthening and re-hardening because of the cutting action has a great impact on the surface quality. This is evident as a loss of the elastic equilibrium state stability and as a destruction of the work-piece surface layer (chipping, peeling, flaking). With increasing curvature of the machined surface (e.g., decreasing radius of cylindrical billet) the surface layer is increasingly prone to destruction.

Specific problems are cutting fluids used in grinding the plasma-sprayed coatings. Machining in this case comes with saturated liquid vapours formed in the surface layer of a billet under high pressure. With a pressure drop on the tool-side in cutting there is such an intensity of vaporization that micro- and macro-fractures of the machined work-piece surface can be initiated.

References

1. Baldaev L.Kh. ed. *Gazotermicheskoe napylenie* [Thermal spraying]. Moscow, Staraya Basmannaya Publ., 2015. 540 p. (in Russian).
2. Kravchenko I. N., Karelina M. Y., Zubrilina E. M., Kolomeychenko A. A. Resource-saving technologies of derivatization of functional nanostructured coatings by high-speed application methods. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Herald of the Don state technical University*, 2015, no.3 (82), pp. 19-27. (in Russian).
3. Yaroslavtsev V.M. *Obrabotka gazotermicheskikh pokrytii rezaniem* [Processing of thermal spray coating machining]. Moscow, Moscow, Bauman MSTU Publ., 2013. 89 p. (in Russian).
4. Klimenko S. A., Mel'niichuk Yu. A., and Vstovskii G. V. Interrelation between the structure parameters, mechanical properties of sprayed materials and the tool life in cutting them. *Sverkhtverdye materialy=Journal of Superhard Materials*, 2008, no.2, pp.56-64. (in Russian).
5. Lebedev V., Chumachenko T. Experimental study of the formation of surface roughness of the sprayed ceramic layer on the necks of the rotor shafts of gas turbine *Problemy mashinostroeniya=Problems of mechanical engineering*, 2013, Vol.16, no.5. pp.56-64. (in Russian).
6. Yaroslavtsev V.M., Sabel'nikov V.V., Gusenko A.Yu. *Issledovanie protsessa struzhkoobrazovaniya pri tochenii plazmennonapylennykh metallokeramik* [The study of the process of chip formation in turning of plasma sprayed metalloceramic] *Teoriya i praktika gazotermicheskogo naneseniya pokrytii* [Theory and practice of gas-thermal coating]. Dmitrov, 1985. pp.203-233. (in Russian).
7. Yaroslavtsev V.M. Process of Chip Forming in Cutting of Polymer Composite Materials with Fibrous Fillers. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering*, 2012, no.2. pp. 81-87. (in Russian).

8. Yaroslavtsev V.M., Gusenko A.Yu. Setup for studying the process of cutting materials at low cutting speeds. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2013, no.3, pp. 77-84. (in Russian). DOI: [10.7463/0313.0541420](https://doi.org/10.7463/0313.0541420)
9. Zorev N.N. *Voprosy mekhaniki protsessa rezaniya metallov* [Problems of mechanics of cutting process of metals]. Moscow, Mashgiz Publ., 1956. 368 p. (in Russian).
10. Yaroslavtsev V.M. New in cutting process. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering*, 2000, no.4. pp. 32-46. (in Russian).
11. Yaroslavtsev V.M., Yaroslavtseva N.A. General approach to the estimation of quality parameters of product when renovating. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no.5, pp. 18-28. (in Russian). DOI: [10.7463/0512.0361862](https://doi.org/10.7463/0512.0361862)
12. Yaroslavtsev V.M., Yaroslavtseva N.A. Reliability prediction of renovated machine parts on the basis of analysis of structure recovery technology. *Metody menedzhmenta kachestva = Methods of quality management*, 1999, no.8, pp.52-58. (in Russian).
13. Yaroslavtsev V.M., Yaroslavtseva N.A. Technological process as an energy conversion device. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no.7, pp. 21-32. (in Russian). DOI: [10.7463/0712.0414854](https://doi.org/10.7463/0712.0414854)
14. Erlikh L.B., Kosobudskii V.A., Vershin L.I. *Volnoobrazovanie na obkatyvaemykh poverkhnostyakh*. [Wave generation on the rolling surfaces]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 51 p. (in Russian).
15. Khudobin L.V. *Smazochno-okhlazhdayushchie tekhnologicheskie sredstva. Spravochnik* [Wave generation on the rolling surfaces]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006, 544 p. (in Russian).
16. Pilipenko A. M., Korobka V. F., Nemets V. M. Abrasive grinding of parts of cylindrical shape after plasma coatings. *Sverkhtverdye materialy=Journal of Superhard Materials*, 1981, no.5, pp.62-65. (in Russian).
17. Maiorov V.A. The flow and heat transfer single phase refrigerant porous sintered materials. *Teploenergetika= Power system*, 1978, no. 1. pp.64-70. (in Russian).
18. Pavlov P.A. *Dinamika vskipaniya sil'no peregretykh zhidkostei*. [The dynamics of boiling-up of strongly superheated liquids.]. Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 1988. 248 p.