

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY

УДК 621.91.01
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-263-274>

Поступила в редакцию 29.07.2019
Received 29.07.2019

**С. А. Чижик^{1,2}, М. Л. Хейфец^{1,3}, В. И. Бородавко³, С. А. Клименко⁴, Ю. А. Мельничук⁴,
А. Г. Колмаков^{5,6}, А. В. Панин⁶, Ю. В. Чугуй⁷, А. А. Батаев⁸, В. Ю. Блюменштейн⁹,
А. А. Кречетов⁹, Г. Б. Премент¹⁰, Т. А. Алексеева¹¹**

¹Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

²Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь

³ОАО «НПО Центр» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

⁴Институт сверхтвердых материалов имени В. Н. Бакуля Национальной академии наук Украины,
Киев, Украина

⁵Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова Российской академии наук,
Москва, Россия

⁶Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук,
Томск, Россия

⁷Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения
Российской академии наук, Новосибирск, Россия

⁸Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

⁹Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, Кемерово, Россия

¹⁰ООО «Фелокт-сервис», Минск, Беларусь

¹¹Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИЗДЕЛИЙ С ГЕТЕРОГЕННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Аннотация. Показано, что при механической обработке изделий из материалов с гетерогенной структурой возможности управления состоянием поверхностного слоя существенно ограничиваются. В качестве примера управления рассмотрена лезвийная обработка изделий из материалов с гетерогенной структурой – точение высокопрочных покрытий, нанесенных газопламенным напылением.

В связи с тем что для аморфной составляющей гетерогенных покрытий свойственно отсутствие деформационного упрочнения, при их обработке наблюдается значительная деформация срезаемого материала и образуется характерная стружка. Высокоинтенсивное термобарическое воздействие на обрабатываемый гетерогенный материал приводит к частичной кристаллизации в тонком поверхностном слое с высоким содержанием аморфной фазы.

Предложен критерий, количественно оценивающий статистические показатели, которые комплексно характеризуют однородность структуры материалов, разброс их свойств по величине. Критерий позволяет определить способность материалов подвергаться резанию без проведения длительных экспериментов.

Ключевые слова: обеспечение качества, поверхностный слой изделия, гетерогенные покрытия, аморфно-кристаллическая структура, механическая обработка, управление процессом резания, поликристаллический сверхтвердый материал, фрактальный формализм

Для цитирования: Обеспечение качества поверхностного слоя изделий с гетерогенными покрытиями при механической обработке / С. А. Чижик [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, № 3. – С. 263–274. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-263-274>

S. A. Chizhik^{1,2}, M. L. Kheifetz^{1,3}, V. I. Borodavko³, S. A. Klimenko⁴, Yu. A. Melniychuk⁴, A. G. Kolmakov^{5,6}, A. V. Panin⁶, Yu. V. Chugui⁷, A. A. Bataev⁸, V. Yu. Blumenstein⁹, A. A. Krechetov⁹, G. B. Prement¹⁰, T. A. Alekseeva¹¹

¹Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

²A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

³Open Joint Stock Company “NPO Center” of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

⁴V. N. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

⁵A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁶Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

⁷Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

⁸Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

⁹T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

¹⁰Limited Liability Company “Felokt-servis”, Minsk, Belarus

¹¹Polotsk State University, Novopolotsk, Belarus

SURFACE QUALITY OF PRODUCTS WITH HETEROGENEOUS COATINGS DURING MECHANICAL PROCESSING

Abstract. It is shown that when machining products from materials with heterogeneous structure, possibilities of management of a condition of a blanket are significantly limited. As an example of management, cutting processing of products from materials with heterogeneous structure – turning of high-strength flame evaporated coverings is considered.

Because for an amorphous component of heterogeneous coverings the lack of deformation hardening is peculiar considerable deformation of the cut-off material is observed at their processing and characteristic shaving is formed. High-intensity thermobaric impact on the processed heterogeneous material leads to partial crystallization in a thin blanket with the high content of an amorphous phase.

As a result of researches the criterion which quantitatively estimates the statistics, which complexly characterize uniformity of structure of materials and dispersion of their properties, is offered. The criterion allows defining ability of materials to be exposed to cutting without carrying out long experiments.

Keywords: quality assurance, product blanket, heterogeneous coverings, amorphous and crystal structure, machining, management of cutting process, polycrystalline superhard material, fractal formalism

For citation: Chizhik S. A., Kheifetz M. L., Borodavko V. I., Klimenko S. A., Melniychuk Yu. A., Kolmakov A. G., Panin A. V., Chugui Yu. V., Bataev A. A., Blumenstein V. Yu., Krechetov A. A., Prement G. B., Alekseeva T. A. Surface quality of products with heterogeneous coatings during mechanical processing. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 263–274 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-263-274>

Введение. Разработка новых материалов требует проведения исследований особенностей процессов и условий их обработки. Эта проблема особенно актуальна для материалов с гетерогенной структурой и неоднородными свойствами, а также изделий, в которых они используются.

Контактное взаимодействие инструмента и заготовки в процессе формообразования изделия сопровождается комплексом силовых, тепловых, химических и других явлений, обусловленных особенностями структуры и свойств материала изделия. При этом важнейшими условиями обработки, наряду с режимами резания, шлифования или деформирования, являются параметры структуры и показатели свойств обрабатываемого материала.

В результате обработки на поверхности изделия формируется совокупность макро- и микро-неровностей, в поверхностных слоях обрабатываемого изделия происходят процессы упрочнения-разупрочнения, структурно-фазовые превращения и другие явления, приобретающие особое значение для обеспечения работоспособности деталей в условиях эксплуатационного нагружения [1, 2].

В случае обработки изделий из материалов с гетерогенной структурой особенности последней существенно ограничивают возможности управления состоянием поверхностного слоя изделий. Поэтому в качестве примера рассмотрим лезвийную обработку изделий из материалов с гетерогенной структурой – точение высокопрочных покрытий, напыленных газотермическими методами.

Стружкообразование при обработке гетерогенных покрытий. Условия обработки влияют на состояние поверхностного слоя изделий при точении газопламенных покрытий с аморфно-кристаллической структурой на основе железа, напыленных порошковой поволокой и порошком [3]. Особенности структуры таких покрытий обуславливают высокую степень их гетерогенности. Ограничение температуры, сопровождающей процесс обработки, связано с воз-

возможностью фазовых превращений в материале покрытия в определенных тепловых условиях. Общий вид стружки, ее строение, степень разрушения характеризуют процесс деформации срезаемого материала в процессе обработки. Деформация, в свою очередь, зависит от механических свойств обрабатываемого материала и его химического состава, величины переднего угла инструмента, скорости резания и других факторов.

В связи с относительно небольшой толщиной гетерогенных покрытий (обычно не более 1,0 мм) их обработка производится с достаточно малыми ($t = 0,1-0,6$ мм) глубинами резания. В большинстве случаев, за исключением удаления дефектного слоя покрытия, инструмент работает в условиях чистовой обработки, то есть в диапазоне минимальных подач, что обуславливает малую толщину слоя материала, удаляемого в процессе резания. Из-за небольших величин сечения среза на криволинейный участок лезвия приходится значительная часть общей рабочей длины режущей кромки инструмента. Это также уменьшает толщину среза, которая является величиной переменной вдоль режущей кромки и при постоянных условиях обработки снижается с увеличением радиуса при вершине инструмента.

При обработке пластичных кристаллических материалов со скоростью резания $v > 1$ м/с и сравнительно малых толщинах среза образуется сливная стружка. Аморфным металлическим материалам свойственна высокая пластичность, что связано с особым механизмом диссипации энергии, который обусловлен дисклинационными процессами, обеспечивающими таким материалам высокую прочность и твердость.

При обработке напыленных порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$ и порошком $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$ газопламенных покрытий, которые характеризуются высоким содержанием аморфной фазы, образуется стружка скалывания. Сторона стружки, контактирующая с резцом, вследствие дополнительной деформации поверхностного слоя из-за трения о переднюю поверхность инструмента имеет гладкую поверхность (рис. 1, *b*), а свободная поверхность стружки – ступенчатую (рис. 1, *a, c*). Такая стружка состоит из сильно деформированных элементов, которые соединены между собой (рис. 1, *d, g*), но в отличие от аналогичной стружки скалывания, образующейся при точении стали с невысокой скоростью резания, они сравнительно легко отделяются друг от друга (рис. 1, *e*). Низкая прочность соединения элементов такой стружки является следствием слоистой структуры напыленных покрытий, в которой прочность сцепления между слоями и отдельными частицами много ниже прочности отдельной частицы.

Процесс стружкообразования при точении покрытия с аморфно-кристаллической структурой происходит за счет большой деформации удаляемого слоя материала и сопровождается значительной усадкой стружки. Изменение усадки стружки коррелирует с изменением силы резания, стойкостью режущего инструмента и качеством обработанной поверхности [4].

Коэффициент усадки стружки, определенный весовым методом, при точении ($v = 1,2$ м/с; $S = 0,05$ мм/об; $t = 0,15$ мм; $h_3 = 0,1$ мм; $g = -10^\circ$) покрытия, напыленного из порошковой проволоки $Fe_{80}B_{20}$, составляет $K_l = 3,5$. При увеличении скорости резания до 1,7 м/с коэффициент усадки стружки снижается до $K_l = 3,2$.

Большая усадка стружки при точении газотермически напыленных покрытий инструментом, оснащенным поликристаллическим сверхтвердым материалом (ПСТМ) марки «киборит» [5], является следствием значительной пластичности аморфной составляющей таких покрытий. Обработка инструментом с отрицательным передним углом приводит к росту усадки стружки из-за интенсификации напряженного состояния материала в зоне резания.

На криволинейном участке режущей кромки инструмента в результате значительного изменения величины переднего угла и толщины стружки процесс стружкообразования происходит в более сложных условиях, чем на прямолинейном участке. Уменьшение радиуса при вершине инструмента приводит к росту усадки стружки, следствием чего является увеличение высоты микронеровностей на обработанной поверхности (рис. 2).

Для аморфной составляющей покрытия свойственно отсутствие деформационного упрочнения. Таким образом, при обработке аморфизированных покрытий имеет место значительная деформация срезаемого материала и образуется характерная стружка скалывания, что обусловлено гетерогенностью структуры. Общий вид стружки, свидетельствует о нестабильности процесса резания.

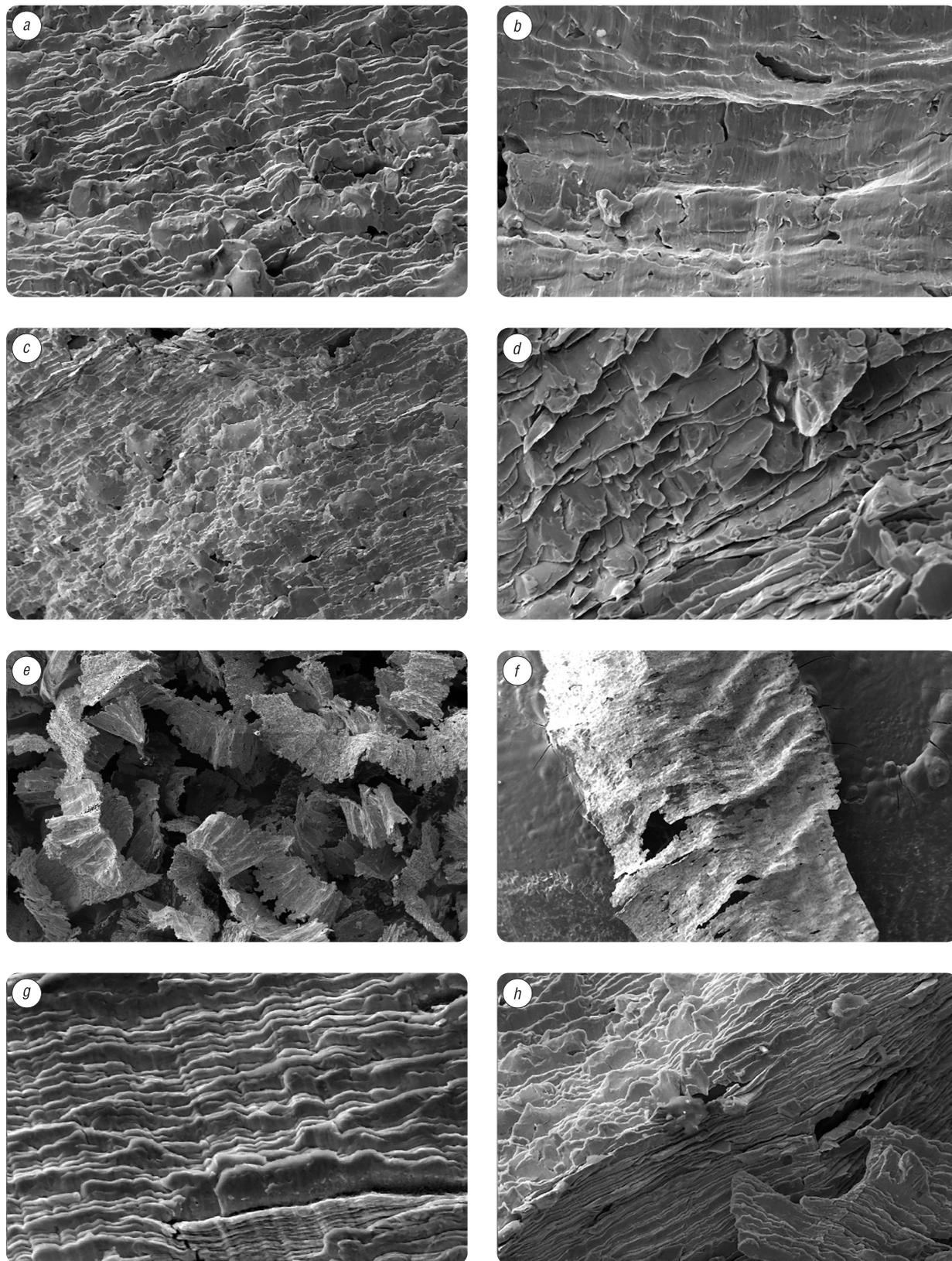


Рис. 1. Стружка, образовавшаяся в процессе точения газопламенного покрытия с аморфно-кристаллической структурой ($v = 1,2$ м/с; $S = 0,05$ мм/об; $t = 0,15$ мм, $h_3 = 0,1$ мм, $\gamma = -10^\circ$): a ($\times 400$), b ($\times 450$), e ($\times 10$), f ($\times 30$) – порошком $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$; c ($\times 200$), d ($\times 450$), g ($\times 450$, $\gamma = 0^\circ$), h ($\times 400$) – порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$

Fig. 1. Chips formed during turning of a flame coating with an amorphous-crystalline structure ($v = 1.2$ m/s; $S = 0.05$ mm/rev; $t = 0.15$ mm, $h_3 = 0.1$ mm, $\gamma = -10^\circ$): a ($\times 400$), b ($\times 450$), e ($\times 10$), f ($\times 30$) – of a powder $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$; c ($\times 200$), d ($\times 450$), g ($\times 450$, $\gamma = 0^\circ$), h ($\times 400$) – of a cored wire $Fe_{80}B_{20}$

При точении покрытия, напыленного порошком $Fe_{80}B_{20}$, образуется стружка, которая практически сразу же разрушается и имеет вид крупнодисперсного порошка. Это связано с особенностями структуры покрытия, которое характеризуется низкой степенью деформации напыленных частиц, следствием чего является их невысокая прочность сцепления между собой, а также значительная пористость. Объем частиц с кристаллической структурой составляет примерно половину объема покрытия. Как правило, эти частицы слабо деформированы, по структуре они подобны исходному порошку, а при обработке резанием происходит их выкрашивание.

В целом при точении такого покрытия под действием сил резания из-за относительно слабого соединения структурных составляющих срезаемый слой материала разделяется на отдельные мелкие частицы. Образование аналогичной стружки имеет место и при точении покрытия с аморфно-кристаллической структурой.

Значительная твердость покрытий требует использования для их лезвийной обработки инструмента с отрицательным передним углом (γ). В этом случае создаются условия для интенсивного упругого взаимодействия со стороны задней поверхности инструмента, что приводит к увеличению высоты неровностей на обработанной поверхности. Процесс пластической деформации покрытия при резании инструментом с передним углом $\gamma = 0^\circ$ протекает более равномерно и менее напряженно ($K_f = 2,4$) в сравнении с процессом резания инструментом с $\gamma = -10^\circ$.

Геометрические параметры обработанной поверхности. Исследования влияния условий обработки на шероховатость обработанной поверхности показывают [6], что при увеличении механических свойств покрытия значительно возрастает высота неровностей и имеет место снижение влияния режимов резания (рис. 2). Так, при точении порошкового покрытия $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$ инструментом, оснащенным круглой режущей пластиной диаметром 7,0 мм из поликристаллического сверхтвердого материала (ПСТМ) марки «киборит», практически незначимым становится изменение величины подачи в 6 раз и скорости резания более чем в 4 раза.

Изменение режимов резания при обработке газопламенного покрытия, напыленного порошком $Fe_{80}B_{20}$, также не приводит к существенному изменению высоты неровностей. В процессе обработки формируется порошкоподобная стружка надлома и имеет место выкрашивание отдельных частиц покрытия.

При точении газопламенных покрытий, напыленных порошком $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$ и порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$ (рис. 3), характеризующихся высокой плотностью, слоистой структурой и наличием незначительного количества слабозакрепленных сферических частиц, варьированием режимами обработки можно существенно снизить шероховатость обработанной поверхности.

При увеличении подачи инструмента высота неровностей монотонно растет. При этом более значимой становится роль вспомогательной режущей кромки инструмента, что обуславливает большее выдавливание обрабатываемого материала в вершины неровностей и их деформирование за счет увеличения объема материала, деформируемого в зоне стружкообразования.

Зависимость высоты неровностей Ra от скорости резания носит неоднозначный характер (рис. 4). В диапазоне скоростей резания $v = 0,7-1,0$ м/с имеется область с повышенной шероховатостью поверхности. Стружка, формируемая при точении в таких условиях, легко разделяется на элементы. Дальнейшее увеличение скорости резания вызывает монотонное снижение высотных параметров шероховатости поверхности, что обусловлено уменьшением объема пластически

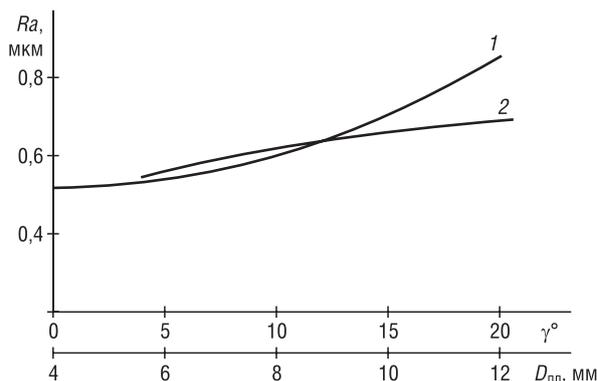


Рис. 2. Зависимость шероховатости обработанной поверхности газопламенного покрытия, напыленного порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$, от величины переднего угла (1) и диаметра при вершине (2) инструмента с ПСТМ марки «киборит» ($v = 1,7$ м/с; $S = 0,05$ мм/об; $t = 0,15$ мм; $h_3 = 0,1$ мм)

Fig. 2. Dependence of the roughness of the treated surface of a gas-flame coating sprayed with $Fe_{80}B_{20}$ flux-cored wire on the value of the rake angle (1) and the diameter at the apex (2) of an instrument with polycrystalline superhard material of the “kiborit” brand ($v = 1.7$ m/s; $S = 0.05$ mm/rev; $t = 0.15$ mm; $h_3 = 0.1$ mm)

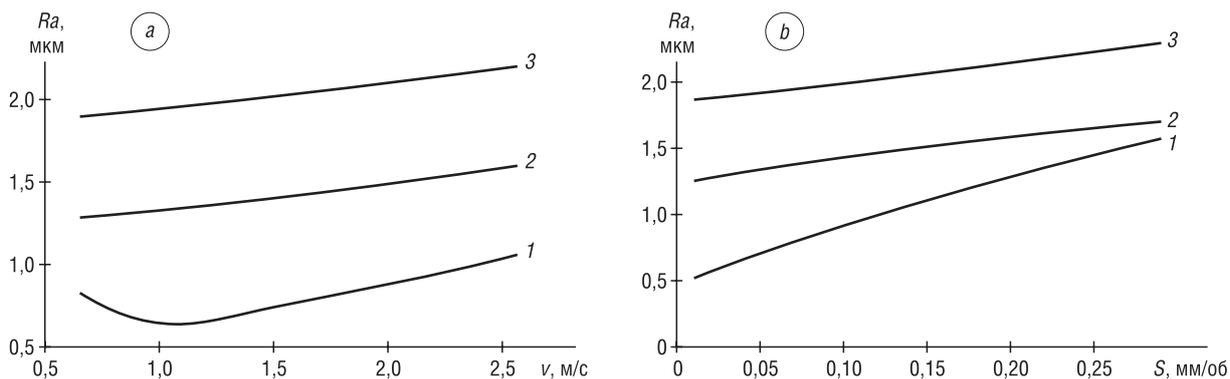


Рис. 3. Влияние скорости резания (а) ($S = 0,05$ мм/об; $t = 0,15$ мм; $h_3 = 0,1$ мм) и подачи (б) ($v = 1,2$ м/с; $t = 0,15$ мм; $h_3 = 0,1$ мм) на шероховатость обработанной поверхности газопламенного покрытия, напыленного порошком $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$: 1–3 – точение инструментом с ПСТМ марки «киборит» на расстоянии 0,6; 1,1; 1,4 мм от основы

Fig. 3. Influence of cutting speed (a) ($S = 0.05$ mm/rev; $t = 0.15$ mm; $h_3 = 0.1$ mm) and filing (b) ($v = 1.2$ m/s; $t = 0.15$ mm; $h_3 = 0.1$ mm) on the roughness of the treated surface of a flame coating sprayed with powder $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$: 1–3 – turning with a tool with polycrystalline superhard material of the “kiborit” brand at a distance of 0.6, 1.1, 1.4 mm from the base

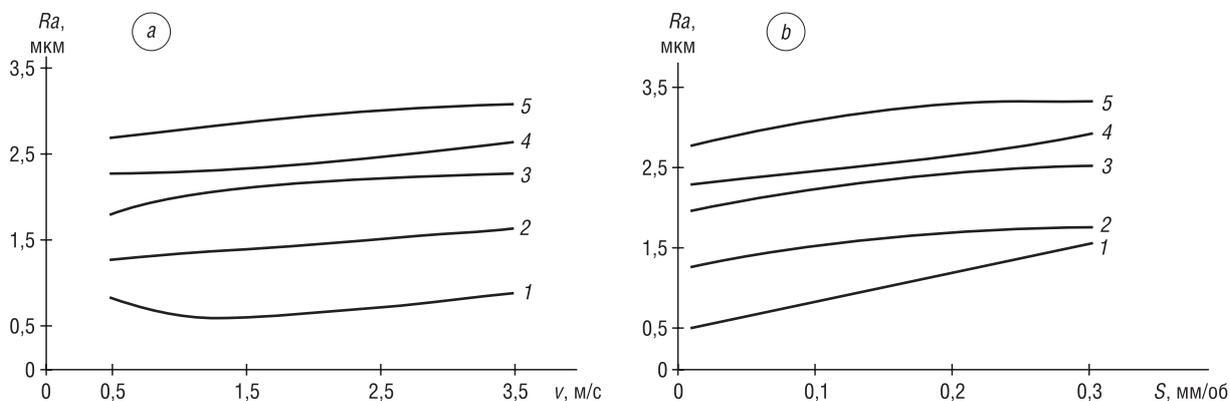


Рис. 4. Влияние скорости резания инструментом с ПСТМ марки «киборит» (а) ($S = 0,05$ мм/об; $t = 0,15$ мм; $h_3 = 0,1$ мм) и подачи (б) ($v = 1,2$ м/с; $t = 0,15$ мм; $h_3 = 0,1$ мм) на шероховатость обработанной поверхности напыленного покрытия: 1 – газопламенного порошковой проволокой $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$; 2 – электродугового порошковой проволокой $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$; 3 – электродугового порошковой проволокой $\text{Fe}_{79}\text{Cr}_{16}\text{B}_5$; 4 – газопламенного порошковой проволокой $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$; 5 – газопламенного порошковой проволокой $\text{Fe}_{79}\text{Cr}_{16}\text{B}_5$

Fig. 4. Effect of cutting speed with a tool with polycrystalline superhard material of the “kiborit” brand (a) ($S = 0.05$ mm/rev; $t = 0.15$ mm; $h_3 = 0.1$ mm) and filing (b) ($v = 1.2$ m/s; $t = 0.15$ mm; $h_3 = 0.1$ mm) on the roughness of the treated surface of the sprayed coating: 1 – on flame powder wire $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$; 2 – on electric arc powder wire $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$; 3 – on electric arc powder wire $\text{Fe}_{79}\text{Cr}_{16}\text{B}_5$; 4 – on gas flame powder wire $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$; 5 – on gas flame powder wire $\text{Fe}_{79}\text{Cr}_{16}\text{B}_5$

деформируемого в зоне резания покрытия и снижением коэффициента трения между инструментом, стружкой и деталью. Стружка, которая образуется при увеличении скорости резания, не разделяется на элементы, что свидетельствует о том, что в процессе точения происходит срезаание компактного слоя материала, а не разделение его на отдельные частицы.

Незначительное увеличение высотных параметров шероховатости поверхности при точении с высокими скоростями резания связано с интенсификацией физико-химического взаимодействия инструмента с обрабатываемым изделием в зоне обработки и изменением условий разрушения обрабатываемого материала, обусловленного изменением динамичности процесса резания. В целом влияние скорости резания на шероховатость обработанной поверхности определяется высокой твердостью и прочностью покрытий.

Влияние условий обработки резцом ($v = 0,7\text{--}17$ м/с; $S = 0,01\text{--}0,20$ мм/об; $h_3 = 0,1\text{--}0,3$ мм; $\gamma = -20\text{--}0^\circ$), оснащенный ПСТМ марки «киборит», газопламенного покрытия, напыленного порошком $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$, на высоту неровностей описывается уравнением регрессии

$$Ra = 0,00041S^{0,22}h_3^{0,33}(90 - \gamma)v^{9-1,94\ln(90-\gamma)}.$$

Значение шага неровностей S_m при точении покрытия, напыленного порошком $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$, с режимами резания, при которых образуется наименьшая шероховатость обработанной поверхности, составляет $S_m = 0,38–0,52$ мкм. В этих условиях относительная опорная длина профиля t_p находится в диапазоне 20–25 % при уровне сечения профиля $p = 30$ %.

Снижение глубины резания, несмотря на ее относительно слабое влияние на процесс пластической деформации в зоне резания, при точении покрытий с аморфно-кристаллической структурой приводит к увеличению шероховатости обработанной поверхности Ra (рис. 5). Это связано со слоистой структурой покрытия, сформированной из сильнодеформированных частиц. При точении с глубинами резания $t = 0,05–0,15$ мм из-за недостаточно высокой прочности сцепления элементов покрытия между собой создаются условия для их вырывания из массива покрытия, а сам процесс обработки является нестабильным.

Увеличение фаски износа инструмента по задней поверхности h_3 приводит к росту высоты неровностей (см. рис. 5). При этом на начальных стадиях износа инструмента увеличение силы на его задних поверхностях, которое может привести к возникновению вибрации, компенсируется увеличением радиуса при вершине инструмента и возникновением выглаживающего эффекта на задней поверхности, что ограничивает увеличение шероховатости поверхности. При дальнейшем износе инструмента на задней поверхности резца образуются зазубрины, изменяется форма и расположение режущей кромки – высота неровностей на обработанной поверхности возрастает.

Гетерогенность структуры покрытия оказывает основное влияние на шероховатость обработанной поверхности [6, 7]. По величине фрактальной размерности совокупности механических свойств материала D_s можно прогнозировать значение высотных параметров шероховатости поверхности покрытия, сформированной при обработке (рис. 6). Для изделий с покрытиями, структура которых характеризуется разными величинами D_s , достигается разная шероховатость обработанной поверхности. Это имеет место как при обработке одного и того же материала, для которого характерны разные значения D_s , так и обработки гаммы покрытий.

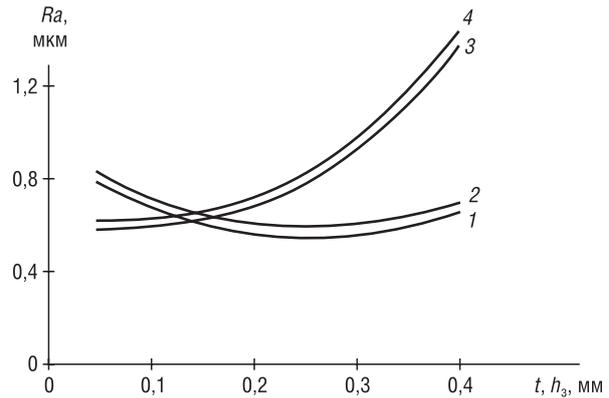


Рис. 5. Влияние глубины резания (1, 2) ($v = 1,2$ м/с; $S = 0,05$ мм/об; $h_3 = 0,1$ мм) и ширины фаски износа инструмента с ПСТМ марки «киборит» по задней поверхности (3, 4) ($v = 1,2$ м/с; $t = 0,15$ мм; $S = 0,05$ мм/об) на шероховатость обработанной поверхности напыленного покрытия: 1, 3 – газопламенное порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$; 2, 4 – газопламенное порошком $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$

Fig. 5. Influence of cutting depth (1, 2) ($v = 1.2$ m/s; $S = 0.05$ mm/rev; $h_3 = 0.1$ mm) and the width of the chamfer of the tool wear with polycrystalline superhard material of the “kiborit” brand grade along the back surface (3, 4) ($v = 1.2$ m/s; $t = 0.15$ mm; $S = 0.05$ mm/rev) on the roughness of the treated surface of the sprayed coating: 1, 3 – on gas flame flux-cored wire $Fe_{80}B_{20}$; 2, 4 – on gas flame powder $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$

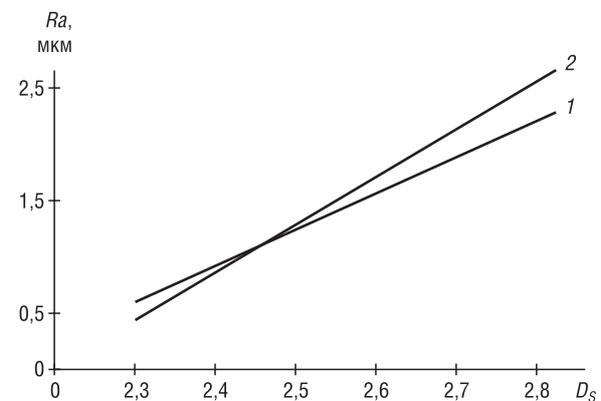


Рис. 6. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от величины фрактальной размерности D_s покрытий ($v = 1,2$ м/с; $S = 0,05$ мм/об; $t = 0,15$ мм; $h_3 = 0,1$ мм): 1 – газопламенное порошком $Fe_{78}B_{10}Si_{12}$; 2 – гаммы газопламенных покрытий систем Fe–B, Fe–Cr–B: газопламенное порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$ ($D_s = 2,32$); электродуговое порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$ ($D_s = 2,57$); электродуговое порошковой проволокой $Fe_{79}Cr_{16}B_5$ ($D_s = 2,68$); газопламенное порошком $Fe_{80}B_{20}$ ($D_s = 2,76$); газопламенное порошком $Fe_{79}Cr_{16}B_5$ ($D_s = 2,82$)

Fig. 6. Dependence of the surface roughness on the fractal dimension D_s of coatings ($v = 1.2$ m/s; $S = 0.05$ mm/rev; $t = 0.15$ mm; $h_3 = 0.1$ mm): 1 – on gas flame powder $Fe_{78}B_{10}Si_{12}$; 2 – gamma of flame coatings of Fe–B, Fe–Cr–B: on gas flame flux-cored wire $Fe_{80}B_{20}$ ($D_s = 2.32$); on electric arc powder wire $Fe_{80}B_{20}$ ($D_s = 2.57$); on electric arc powder wire $Fe_{79}Cr_{16}B_5$ ($D_s = 2.68$); on gas flame powder $Fe_{80}B_{20}$ ($D_s = 2.76$); on gas flame powder $Fe_{79}Cr_{16}B_5$ ($D_s = 2.82$)

Аппроксимирующие прямые $Ra = f(D_s)$ для газопламенного напыления покрытий порошком и проволокой расположены в непосредственной близости друг от друга, что позволяет говорить о единой тенденции. Более качественная поверхность формируется при обработке покрытий, характеризующихся меньшей величиной фрактальной размерности совокупности механических свойств D_s материалов, из которых они изготовлены. Поэтому по величине D_s правомерно оценивать обрабатываемость покрытий по критерию шероховатости обработанной поверхности, а также других материалов с гетерогенной структурой.

Фрактальные представления о структуре обрабатываемого материала позволяют разработать единый интегральный критерий обрабатываемости. В качестве такого критерия предлагается использовать величину D_s . Данный критерий основан на методологии фрактального формализма и количественно оценивает статистические показатели, комплексно характеризующие однородность структуры материалов и разброс их свойств по величине.

Физико-механические свойства и фазовые превращения в структуре покрытий. При точении покрытий с аморфно-кристаллической структурой острым резцом, оснащенным ПСТМ марки «киборит», со скоростями резания > 2 м/с температура резания превышает 1000 °С, что выше температуры кристаллизации ($Q_{кр}$) сплавов, которые используются для нанесения покрытий [4]. В то же время результаты рентгеноструктурного анализа свидетельствуют о том, что в процессе обработки инструментом с ПСТМ марки «киборит» в обрабатываемом материале не происходит структурно-фазовых превращений. Анализ рентгенограмм, полученных на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3,0 (CoK α -излучение) по методике [8], с поверхности покрытий показывает, что в покрытиях при точении острым резцом в диапазоне скоростей резания до 3 м/с сохраняется исходное содержание аморфной фазы.

Вероятность протекания кристаллизации в материалах с аморфно-кристаллической структурой определяется их химическим составом, структурой и скоростью нагрева, при увеличении которой возрастает температура кристаллизации ($Q_{кр}$). Особенно интенсивно $Q_{кр}$ увеличивается в диапазоне высоких скоростей нагрева. Хотя в процессе точения имеет место быстрый и локальный нагрев поверхностного слоя покрытия, за счет применения инструмента, оснащенного ПСТМ марки «киборит», который характеризуется высокой теплопроводностью, обеспечивается быстрый отвод тепла из зоны резания.

Скорость изменения температуры слоя покрытия, расположенного на глубине 0,01 мм от поверхности резания, составляет $\frac{\partial Q}{\partial \tau} = (2,31-8,8) \cdot 10^6$ К/с [2, 9]. В то же время критическая скорость охлаждения для аморфизации сплава Fe₇₈Si₁₂B₁₀ равна $1,8 \cdot 10^5$ К/с, для сплава Fe₈₀B₂₀ – $6,0 \cdot 10^6$ К/с [10]. Сравнивая приведенные значения, можно заключить, что при точении покрытий острым резцом в рассматриваемом диапазоне скоростей резания выполняется условие аморфизации обрабатываемого материала.

Расчеты и результаты экспериментов показывают, что в процессе точения покрытий с аморфно-кристаллической структурой отсутствуют предпосылки для кристаллизации обрабатываемого материала в поверхностном слое – в покрытии сохраняется аморфная матрица с включениями кристаллических фаз.

При увеличении износа инструмента в процессе точения со скоростью резания $v > 1,7$ м/с газопламенных покрытий, напыленных порошком Fe₇₈Si₁₂B₁₀ и порошковой проволокой Fe₈₀B₂₀, характеризующихся высоким содержанием аморфной фазы (> 75 %), в обрабатываемом материале наблюдается незначительное его снижение.

Результаты рентгеноструктурных исследований показывают (таблица), что содержание аморфной фазы снижается до 13 % при ширине фаски износа инструмента по задней поверхности $h_3 = 0,4$ мм. В то же время после точения изношенным резцом электродуговых покрытий порошковыми проволоками Fe₈₀B₂₀, Fe₇₉Cr₁₆B₅, газопламенного покрытия, напыленного порошком Fe₇₉Cr₁₆B₅, характеризующихся меньшим содержанием аморфной фазы (≈ 50 %), сохраняется исходное содержание материалов покрытий (рис. 7).

Незначительные фазовые превращения, наблюдающиеся в покрытиях с высоким содержанием аморфной фазы при точении изношенным резцом, связаны с изменением напряженно-деформированного состояния обрабатываемого материала со стороны задней поверхности инструмента.

Влияние условий процесса точения инструментом с ПСТМ марки «киборит» на содержание аморфной фазы в покрытиях при глубине резания $t = 0,15$ мм
The influence of the conditions of the turning process with a tool with polycrystalline superhard material of the “kiborit” brand on the content of the amorphous phase in the coatings at a depth of cut $t = 0.15$ mm

Покрытие	Содержание аморфной фазы, %		
	$v = 0,5$ м/с; $S = 0,02$ мм/об; $h_3 = 0,1$ мм	$v = 0,7$ м/с; $S = 0,05$ мм/об; $h_3 = 0,1-0,2$ мм	$v = 1,7$ м/с; $S = 0,05$ мм/об; $h_3 = 0,4$ мм
Газопламенное порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$	90	90	80
порошком $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$	75	75	68
порошком $Fe_{79}Cr_{16}B_5$	48	Не изменяется	
Электродуговое порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$	45		
порошковой проволокой $Fe_{79}Cr_{16}B_5$	40		

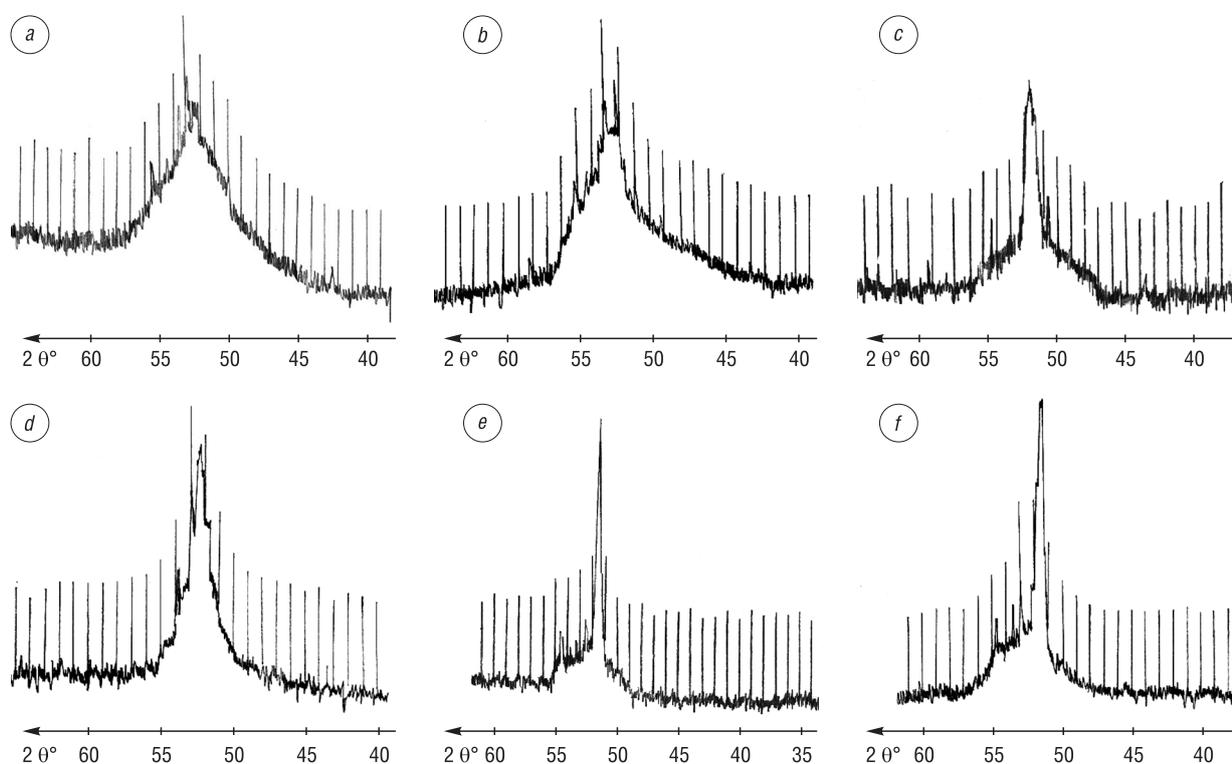


Рис. 7. Фрагменты рентгенограмм напыленных покрытий после обработки инструментом с ПСТМ марки «киборит»: *a, b* – газопламенное порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$; *c, d* – электродуговое порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$; *e, f* – электродуговое порошковой проволокой $Fe_{79}Cr_{16}B_5$; *a, c, e* – $v = 0,7$ м/с, $S = 0,05$ мм/об, $t = 0,15$ мм, $h_3 = 0,1$ мм; *b* – $v = 1,7$ м/с, $S = 0,05$ мм/об, $t = 0,15$ мм, $h_3 = 0,4$ мм; *d, e* – $v = 2,7$ м/с, $S = 0,05$ мм/об, $t = 0,15$ мм, $h_3 = 0,4$ мм

Fig. 7. Fragments of X-ray diffraction patterns of the deposited coatings after processing with a tool with polycrystalline superhard material of the “kiborit” brand: *a, b* – on gas flame flux-cored wire $Fe_{80}B_{20}$; *c, d* – on electric arc powder wire $Fe_{80}B_{20}$; *e, f* – on electric arc powder wire $Fe_{79}Cr_{16}B_5$; *a, c, e* – $v = 0.7$ m/s, $S = 0.05$ mm/rev, $t = 0.15$ mm, $h_3 = 0.1$ mm; *b* – $v = 1.7$ m/s, $S = 0.05$ mm/rev, $t = 0.15$ mm, $h_3 = 0.4$ mm; *d, e* – $v = 2.7$ m/s, $S = 0.05$ mm/rev, $t = 0.15$ mm, $h_3 = 0.4$ mm

По мере изнашивания инструмента в процессе точения покрытий происходит увеличение ортогональной составляющей силы резания P_y , что интенсифицирует воздействие на поверхностный слой покрытия со стороны задней поверхности инструмента, приводящее к его кристаллизации.

После обработки покрытий изношенным инструментом со скоростью резания $v < 1,5$ м/с в обрабатываемом материале не происходят фазовые превращения, несмотря на то, что сила резания имеет большое значение. Это связано со значительно меньшим уровнем температур в зоне резания

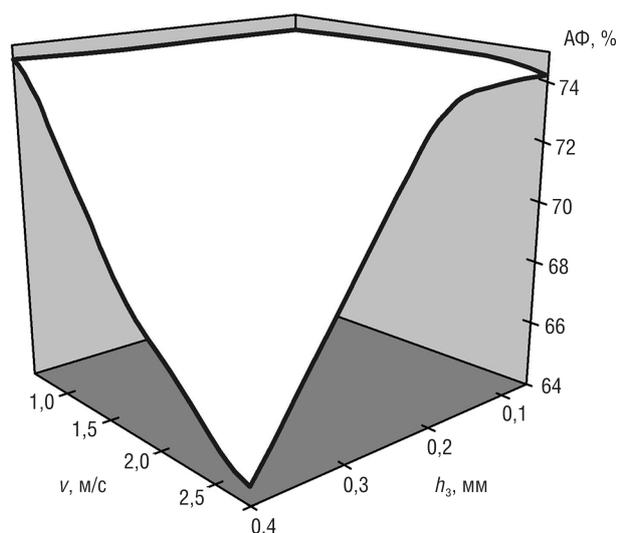


Рис. 8. Зависимость содержания аморфной фазы в газопламенном покрытии, напыленном порошком $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$, от скорости резания v и ширины фаски износа инструмента с ПСТМ марки «киборит» по задней поверхности h_3 ($S = 0,05$ мм/об; $t = 0,15$ мм)

Fig. 8. Dependence of the content of the amorphous phase in a gas-flame coating sprayed with $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$ powder on the cutting speed v and the width of the wear chamfer of the tool with polycrystalline superhard material of the “kiborit” brand on the back surface h_3 ($S = 0.05$ mm/rev; $t = 0.15$ mm)

Заключение. В связи с тем что для аморфной составляющей гетерогенных покрытий свойственно отсутствие деформационного упрочнения, при их обработке наблюдается значительная деформация срезаемого материала и образуется характерная стружка скалывания, общий вид которой свидетельствует о нестабильности процесса резания.

Только одновременное высокоинтенсивное термобарическое воздействие на обрабатываемый гетерогенный материал приводит к частичной кристаллизации в тонком поверхностном слое с высоким содержанием аморфной фазы. При этом к обработке покрытий, содержащих не более половины аморфной фазы, не устанавливаются ограничения по мощности резания.

В результате исследований предложен основанный на методологии фрактального формализма критерий, который количественно оценивает статистические показатели, комплексно характеризующие однородность структуры материалов, разброс их свойств по величине. Данный критерий позволяет определить способность материалов подвергаться резанию без проведения длительных экспериментов.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T18P-183) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-58-00009-Бел_а).

Acknowledgements

The work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Project T18P-183) and by Russian Foundation for Basic Research (Project 18-58-00009-Бел_а).

Список использованных источников

1. Технологические основы управления качеством машин / А. В. Васильев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – 256 с.
2. Обработка резанием деталей с покрытиями / С. А. Клименко [и др.]; под ред. С. А. Клименко. – Киев: Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – 353 с.
3. Клименко, С. А. Фрактальна параметризація структури матеріалів, їх оброблюваність різанням та зносостійкість різального інструменту / С. А. Клименко, Ю. О. Мельничук, Г. В. Встовський. – Київ: ІНМ ім. В. М. Бакуля, 2009. – 170 с.

при обработке с низкими скоростями резания. Поэтому можно заключить, что только одновременное высокоинтенсивное термобарическое воздействие на материал в процессе обработки приводит к частичной кристаллизации в тонком поверхностном слое покрытий с высоким содержанием аморфной фазы (рис. 8).

В связи с возможностью частичной кристаллизации материала покрытия в процессе обработки для ограничения условий резания целесообразно использовать величину граничной мощности резания [4]

$$W = vP_z \leq [W],$$

где $[W]$ – мощность резания, превышение которой приводит к структурно-фазовым превращениям в обрабатываемом покрытии; P_z – тангенциальная составляющая силы резания.

Для случая точения инструментом, оснащенным ПСТМ марки «киборит», газопламенных покрытий, напыленных порошковой проволокой $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ и порошком $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$, $W = 1100$ Вт. Однако применительно к покрытиям с невысоким содержанием аморфной фазы ($\approx 50\%$) в исследованном диапазоне условий обработки не выявлены ограничения по мощности резания.

4. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: в 6 т. / под общ. ред. Н.В. Новикова. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАН Украины, 2006. – Т. 5: Обработка материалов лезвийным инструментом / под ред. С.А. Клименко. – 316 с.
5. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. – М.: Машиностроение, 2014. – 608 с.
6. Наукоёмкие технологии в машиностроении / под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2012. – 528 с.
7. Клименко, С.А. Шероховатость поверхности деталей с напыленными аморфно-кристаллическими покрытиями на основе железа, обработанных инструментом с ПКНБ / С.А. Клименко, Ю.А. Мельничук // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. – 2018. – №11. – С. 32–38.
8. Ванштейн, Б.К. Дифракция рентгеновских лучей на цепочных молекулах / Б.К. Ванштейн. – М.: АН СССР, 1963. – 372 с.
9. Обеспечение качества изделий в технологических комплексах / С.А. Чижик [и др.]; под ред. М.Л. Хейфеца. – Минск: Беларус. навука, 2019. – 248 с.
10. Куницкий, Ю.А. Некристаллические металлические материалы и покрытия в технике / Ю.А. Куницкий, В.Н. Коржик, Ю.С. Борисов. – Киев: Техніка, 1988. – 198 с.

References

1. Vasil'ev A. V., Dal'skii A. M., Klimenko S. A. (et al.). *Technological bases of quality management of cars*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 256 p. (in Russian).
2. Klimenko S. A. (ed.), Kolomiets V. V., Kheifets M. L., Pilipenko A. M., Mel'niichuk Yu. A. *Processing by Cutting of Details with Coverings*. Kiev, V. N. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2011. 353 p. (in Russian).
3. Klimenko S. A., Mel'niichuk Yu. O., Vstovskii G. V. *Fractal Parameterization of the Structure of Materials, their Machinability by Cutting and Wear Resistance of a Cutting Tool*. Kiev, V. N. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2009. 170 p. (in Ukrainian).
4. Klimenko S. A. (ed.). *Superhard Materials. Receiving and Application. Vol. 5: Blade material processing*. Kiev, V. N. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, CPI of "ALKON" of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2006. 316 p. (in Russian).
5. Bogatyreva G. P., Burykin V. V., Gargin V. V., Novikov N. V., Klimenko S. A. (et al.). *Tools from Superhard Materials*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2014. 608 p. (in Russian).
6. Suslov A. G., Bazrov B. M., Bez'yazychnyi V. F. (et al.). *High Technologies in Mechanical Engineering*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012. 528 p. (in Russian).
7. Klimenko S. A., Melniychuk Yu. A. Roughness of a surface of the details with the raised dust amorphous and crystal coverings on the basis of iron processed by the tool with PKNB. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Bryansk State Technical University*, 2018, no. 11, pp. 32–38 (in Russian).
8. Vanshtein B. K. *Chain Molecule X-Ray Diffraction*. Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 1963. 372 p. (in Russian).
9. Chizhik S. A., Vityaz' P. A., Kheifets M. L., Borodavko V. I., Prement G. B., Klimenko S. A., Bataev A. A., Blyumenshtein V. Yu., Vasil'ev A. S., Kolmakov A. G. *Ensuring Quality of Products in Technological Complexes*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2019. 248 p. (in Russian).
10. Kunitskii Yu. A., Korzhik V. N., Borisov Yu. S. *Not Crystal Metal Materials and Coverings in the Equipment*. Kiev, Tekhnika Publ., 1988. 198 p. (in Russian).

Информация об авторах

Чижик Сергей Антонович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, первый заместитель Председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь); главный научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровка, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: chizhik@presidium.bas-net.by

Хейфец Михаил Львович – доктор технических наук, профессор, заместитель академика-секретаря Отделения физико-технических наук Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь); главный научный сотрудник, ОАО «НПО Центр» Национальной академии наук Беларуси (ул. Шаранговича, 19, 220018, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mlk-z@mail.ru

Information about the authors

Sergey A. Chizhik – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, First Deputy Chairman of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Chief Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chizhik_sa@tut.by

Mikhail L. Kheifetz – D. Sc. (Engineering), Professor, Deputy Academician-Secretary of the Department Physical and Technical Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Chief Researcher, Open Joint Stock Company "NPO Center" of the National Academy of Sciences of Belarus (19, Sharangovich Str., 220018, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mlk-z@mail.ru

Бородавко Владимир Иванович – генеральный директор, ОАО «НПО Центр» Национальной академии наук Беларуси (ул. Шаранговича, 19, 220018, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mlk-z@mail.ru

Клименко Сергей Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля Национальной академии наук Украины (ул. Автозаводская, 2, 04074, Киев, Украина). E-mail: atmu@meta.ua

Мельничук Юрий Алексеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля Национальной академии наук Украины (ул. Автозаводская, 2, 04074, Киев, Украина). E-mail: atmu@meta.ua

Колмаков Алексей Георгиевич – член-корреспондент Российской академии наук, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (Ленинский пр., 49, 119334, Москва, Российская Федерация); главный научный сотрудник, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (пр. Академический, 2/4, 634055, Томск, Российская Федерация). E-mail: kolmakov@imet.ac.ru

Панин Алексей Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (пр. Академический, 2/4, 634021, Томск, Российская Федерация). E-mail: pav@ispms.tsc.ru

Чугуй Юрий Васильевич – доктор технических наук, профессор, научный руководитель, Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук (ул. Русская, 41, 630058, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

Батаев Анатолий Андреевич – доктор технических наук, профессор, ректор, Новосибирский государственный технический университет (пр. К. Маркса, 20, 630073, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: rector@nstu.ru

Блюментейн Валерий Юрьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева (ул. Красноармейская, 117, 650000, Кемерово, Российская Федерация). E-mail: blumenstein.vu@gmail.com

Кречетов Андрей Александрович – кандидат технических наук, доцент, ректор, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева (ул. Красноармейская, 117, 650000, Кемерово, Российская Федерация). E-mail: krechetovaa@kuzstu.ru

Премент Геннадий Борисович – начальник цеха, ООО «Фелокт-сервис» (ул. Куприянова, 2а, 220086, Минск, Республика Беларусь). E-mail: prement@tut.by

Алексева Татьяна Анатольевна – старший преподаватель кафедры, Полоцкий государственный университет (ул. Блохина, 29, 211440, Новополоцк, Республика Беларусь). E-mail: alekseeva671@gmail.com

Vladimir I. Borodavko – Director General, Open Joint Stock Company “NPO Center” of the National Academy of Sciences of Belarus (19, Sharangovich Str., 220018, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mlk-z@mail.ru

Sergei A. Klimenko – D. Sc. (Engineering), Professor, Deputy Director for Research, V.N. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (2, Avtozavodskaya Str., 04074, Kiev, Ukraine). E-mail: atmu@meta.ua

Yuriy A. Melniychuk – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher, V.N. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (2, Avtozavodskaya Str., 04074, Kiev, Ukraine). E-mail: atmu@meta.ua

Andrey G. Kolmakov – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, D. Sc. (Engineering), Deputy Director for Research, A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences (49, Leninskii Ave., 119334, Moscow, Russian Federation); Chief Researcher, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/4, Akademicheskii Ave., 634055, Tomsk, Russian Federation). E-mail: kolmakov@imet.ac.ru

Alexey V. Panin – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/4, Akademicheskii Ave., 634055, Tomsk, Russian Federation). E-mail: pav@ispms.tsc.ru

Yuriy. V. Chugui – D. Sc. (Engineering), Professor, Research Supervisor, Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (41, Russkaya Str., 630058, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

Anatoliy A. Bataev – D. Sc. (Engineering), Professor, Rector, Novosibirsk State Technical University (20, K. Marks Ave., 630073, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: rector@nstu.ru

Valeriy Yu. Blumenstein – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (117, Krasnoarmeiskaya Str., 650000, Kemerovo, Russian Federation). E-mail: blumenstein.vu@gmail.com

Andrey A. Krechetov – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Rector, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (117, Krasnoarmeiskaya Str., 650000, Kemerovo, Russian Federation). E-mail: krechetovaa@kuzstu.ru

Gennadiy B. Prement – Foreman, Limited Liability Company “Felokt-servis” (2a, Kupriyanov Str., 220086, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: prement@tut.by

Tatiana A. Alekseeva – Senior Lecturer of the Department, Polotsk State University (29, Blokhin Str., 211440, Novopolotsk, Republic of Belarus). E-mail: alekseeva671@gmail.com