

УДК 621.91.01/620.22

А. А. Башков, ассист., **С. В. Иванов**, инженер., **А. М. Михайлов**, ассист., **Д. А. Рябов**, ст. преп., **А. А. Акулова**, магистр.

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева (НГТУ им. Алексеева), г. Нижний Новгород, Россия

Тел./Факс: +7(831)436-94-75; E-mail: nntu@nntu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАРОСТООБРАЗОВАНИЯ И ЕГО СТРУКТУРЫ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

В статье рассмотрен процесс наростообразования при точении конструкционной углеродистой стали 50 твёрдосплавным режущим инструментом (ВК8) на различных режимах резания. Получены образцы нароста и проведен металлографический анализ для оценки деформационных процессов. Рассмотрены особенности процессов, протекающих в приконтактных слоях между стружкой и передней поверхностью инструмента. Дополнительно проведен спектральный анализ подошв нароста, на основании которого описан вихревой механизм изнашивания твердого сплава.

Ключевые слова: трение, износ, наростообразование, контактные поверхности, прирезцовый слой, лезвийная обработка.

A. A. Bashkov, S. V. Ivanov, A. M. Mikhailov, D. A. Ryabov, A. A. Akulova.

STUDY OF THE PROCESS OF GROWTH AND ITS STRUCTURE DURING LATHE MACHINING OF STRUCTURAL STEELS

The article examines the process of buildup formation during turning of structural carbon steel 50 with a hard-alloy cutting tool (VK8) under various cutting conditions. Samples of the buildup were obtained and metallographic analysis was performed to evaluate deformation processes. The features of the processes occurring in the contact layers between the chip and the tool's rake face are considered. Additionally, spectral analysis of the buildup bases was conducted, on the basis of which a vortex wear mechanism of the hard alloy was described.

Keywords: friction, wear, build-up formation, contact surfaces, tool-tip layer, blade machining.

1. Введение

Механическая обработка сталей твердосплавным инструментом является одной из наиболее распространенных операций в металлообработке. В настоящее время существует огромное множество марок твердых сплавов и составов износостойких покрытий [5], которые защищают режущую кромку от износа и увеличивают период стойкости режущего инструмента. Однако в определенных условиях обработки (пластичные материалы, низкие скорости, отсутствие СОЖ) на передней поверхности могут образовываться наросты – участки материала, прилипшие к режущей кромке. Это происходит из-за высоких температур и удельных давлений в приконтактных слоях, которые вызывают адгезию обрабатываемого и инструментального материалов. Наростообразование существенно влияет на процесс резания, ухудшая качество получаемых поверхностей из-за изменения геометрии режущего клина, и увеличивая износ передней поверхности инструмента, путем разрушения покрытия из-за вырыва зерен твердого сплава.

Процесс образования нароста подробно рассмотрен в трудах Боброва В. Ф. [7], Грановского Г. И. [4], но механизм наростообразования остается изученным недостаточно. Под наростом автор понимал клиновидную, неподвижную область материала обрабатываемой заготовки, расположенную у лезвия инструмента перед его передней поверхностью. На ювенильных (химически чистых) поверхностях стружки и инструмента при определенных температуре и давлении создаются условия для

адгезионного схватывания материалов стружки и инструмента. Также автор подчеркивает, что частота наростообразования составляет около 3000-4000 циклов в минуту и возрастает с увеличением скорости резания.

Нарост представляет собой слои обработанного материала, которые адгезионно закрепляются сначала на режущей кромке инструмента, а потом друг на друге. При установившемся резании в прирезцовых слоях стружки возможно плавление деформированных объемов обрабатываемого материала и вихревое движение частиц. В локализованной области высокого давления (ОВД) прирезцового слоя на передней поверхности инструмента могут образовываться первичные очаги затормаживания частиц обрабатываемого материала (рис.1). Материал на образование таких пластических волн расходится из промежуточных областей (за волной образуется впадина), причем материал может быть как обрабатываемый, превращенный в стружку, так и инструментальный.

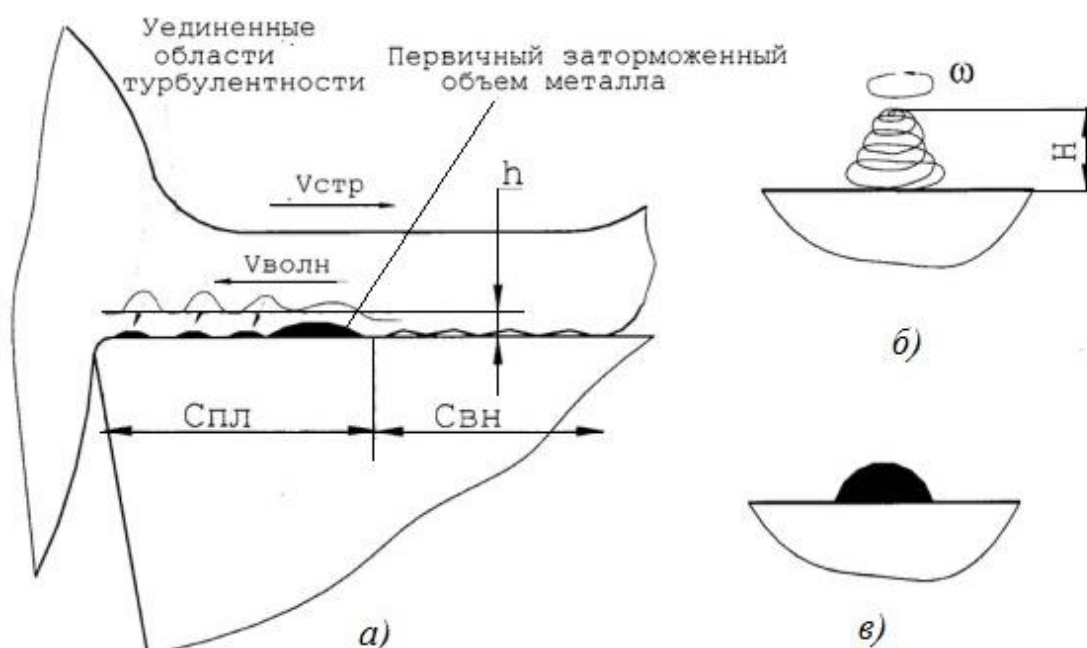


Рисунок 1. Схема образования нароста на передней поверхности инструмента: $С_{пл}$ – длина зоны пластического контакта, $С_{вн}$ – длина зоны внешнего контакта, h – толщина квазижидкого прирезцового слоя стружки, H – высота вихревого столба, ω – угловая скорость вихря, $V_{стр}$ – скорость стружки, $V_{волн}$ – скорость волн.

При резании пластическое течение приконтактных слоев стружки ведет к потере устойчивости материала и созданию здесь уединенных областей турбулентности, погруженных в ламинарное течение, бегущих к режущему лезвию. Волны из квазижидкого металла прирезцового слоя формируются в основном за счет материала стружки. Если же на образование зародышей вихревой структуры используется инструментальный материал поверхностного слоя резца, то будет наблюдаться унос частиц инструмента из участка ОВД, т.е. его износ.

Проблема наростообразования при обработке сталей является одной из наиболее изученных в области металлорежущих процессов [1, 2]. Однако в настоящее время в связи с развитием материаловедения ученые разрабатывают современные подходы к синтезу новых материалов (с уникальными структурой и свойствами) для получения оптимальных физико-механических свойств изделий. Развитие аддитивных технологий

позволяет печатать изделия с композитной структурой из различных материалов. Для таких материалов необходимо вновь подбирать оптимальные режимы резания, покрытия, геометрию режущей части инструментов и состав смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ).

Эти факторы подчеркивают важность более глубоко изучения механизмов структурных изменений в приконтактных слоях стружки из различных материалов в условиях высоких скоростей деформирования и нагрева, и их влияния на поверхностное разрушение твердых сплавов с применением современных методов и инструментов.

2. Постановка цели исследования

Для изучения структуры наростов применяются различные методы, например, металлографический [3]. Этот метод позволяет выявить химический состав наростов, микроструктурные изменения, такие как деформационные слои и зернистость материала. С помощью рентгенофлуоресцентной спектроскопии можно определить распределение легирующих элементов в наростах, что помогает понять природу их формирования.

На качество процесса резания главным образом влияют физико-химические процессы, протекающие в зоне обработки (в системе «инструмент-деталь»). В зоне контакта стружки с передней поверхностью возникают следующие явления: адгезия, упрочнение и разупрочнение поверхностных слоёв, диффузия, эрозия, окисление и другие [4]. Целью данного исследования является определение механизма формирования нароста и его структуры при токарной обработке конструкционной углеродистой стали 50, а также разработка методов снижения интенсивности данного процесса.

3. Исследуемые материалы

В качестве исследуемого обрабатываемого материала использовалась сталь 50 - сталь конструкционная углеродистая качественная (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав стали 50 (в %)

C	Si	Mn	Ni	S
0.47 - 0.55	0.17 - 0.37	0.5 - 0.8	до 0.3	до 0.04
P	Cr	Cu	As	
до 0.035	до 0.25	до 0.3	до 0.08	

Механические свойства: предел прочности: 700–850 МПа. Твердость после термообработки: 200–300 НВ. Пластичность: относительно низкая из-за высокого содержания углерода. Структура после термообработки: мартенсит или сорбит при закалке и отпуске. Перлитно-ферритная структура в отожженном состоянии. Перлит занимает больше половины объёма (0,53% C).

Исходная структура приведена на рис. 2.

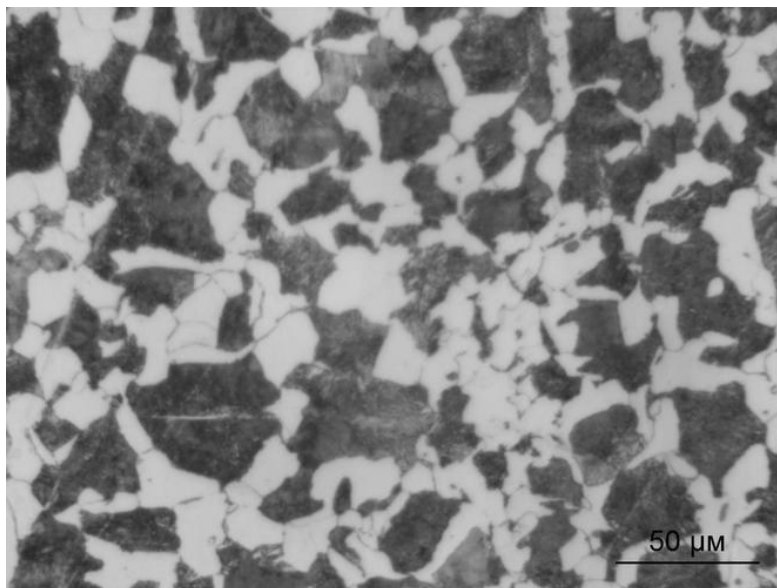


Рисунок 2. Микроструктура Ст50 в исходном состоянии

Сталь 50 относится к углеродистым конструкционным сталям средней прочности и повышенной твердости. Она широко применяется для изготовления деталей, работающих при высоких нагрузках, таких как валы, шестерни и оси. При обработке резанием сталь 50 демонстрирует ряд особенностей, обусловленных ее химическим составом, структурой и механическими свойствами. Сталь 50 обладает высокой прочностью и твердостью, что усложняет процесс обработки. Режущие инструменты подвергаются значительным нагрузкам и износу. После термической обработки твердость может превышать 250 НВ, что требует применения твердых сплавов или инструментов с покрытием.

При низких скоростях резания возможно образование наростов на режущей кромке. Это связано с высокой пластичностью стали в зоне резания и адгезией материала к инструменту. В зоне резания выделяется значительное количество тепла из-за высокой твердости и прочности материала. Это требует эффективного применения смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) для предотвращения перегрева инструмента и заготовки.

4. Описание экспериментальной установки

Для наблюдений условия свободного резания (в процессе резания работает только главная режущая кромка) предварительно на заготовке были получены пояски шириной от 2-4 мм. В качестве режущего инструмента применялся твердосплавный резец с пластиной ВК8 (сплав вольфрамовой группы). Параметры режущей пластины: главный угол в плане $\phi = 55^\circ$, задний угол 7° , передний угол $\gamma = 0^\circ$, радиус при вершине 0,3 мм. Способ крепления - прижим прихватом сверху.

Известно, что нарост образуется на малых скоростях резания, а также при обработке пластичных материалов [4]. Обработка с целью получения нароста выполнялась на токарно-винторезном станке 1К62 с закреплением заготовки в центрах (рис. 3).



Рисунок 3. Экспериментальная установка

Пояски срезались твердосплавным резцом с поперечной подачей на различных режимах резания в течении 2-3 секунд, чтобы нарост не успевал «свариваться» с передней поверхностью пластины. Далее резец резко отводился от заготовки для его сохранения на режущей кромке (рис.4). Обработка проводилась без применения СОЖ.

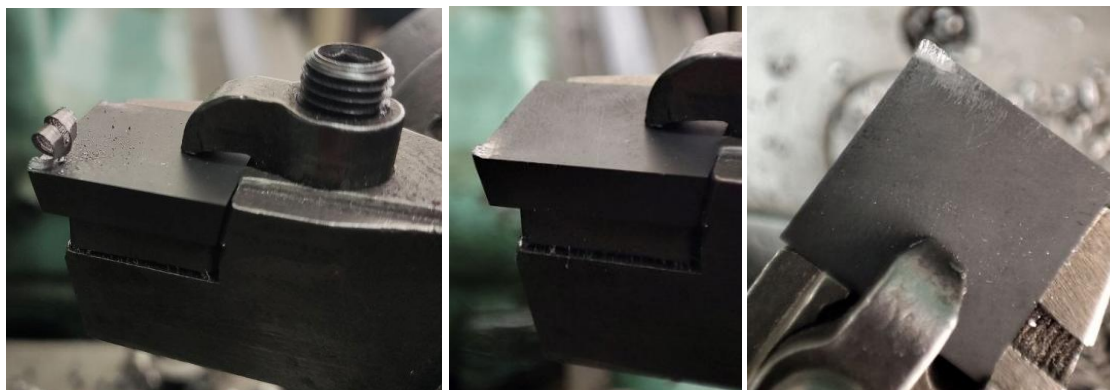


Рисунок 4. Пластина с наростом

Полученные образцы были промаркированы и залиты прозрачной эпоксидной смолой в специальных емкостях для проведения дальнейшего микроструктурного анализа.

5. Оборудование и методы исследования

Для исследования подошвы нароста был проведен микроструктурный анализ на цифровом микроскопе и растровом электронном с EDS спектрометром (рис.5). Были подготовлены шлифы и протравлены в спиртовом растворе азотной кислоты.



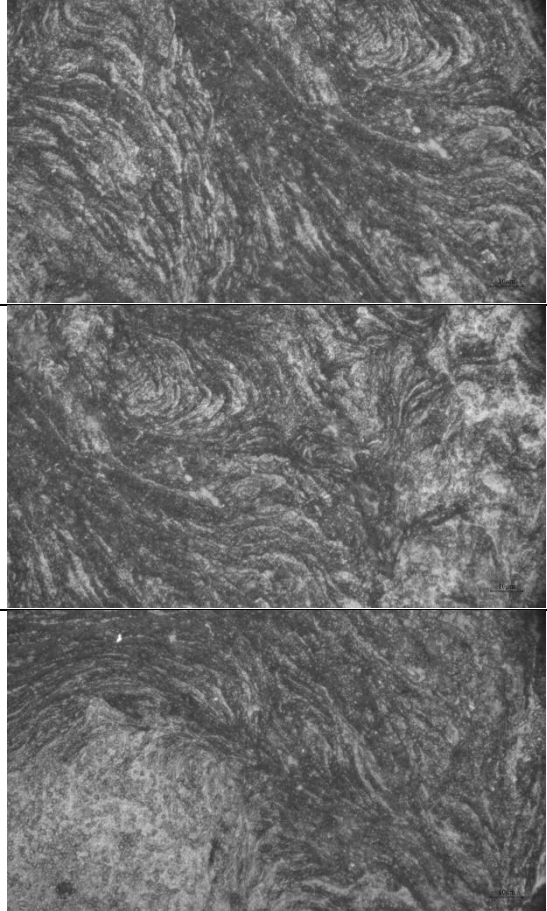
Рисунок 5. Применяемое оборудование: а) цифровой микроскоп MET 1T; б) машина полировальная МП.2-230; в) растровый электронный микроскоп WIN SEM A6000 с EDS спектрометром

6. Анализ полученных результатов

Микрофотографии с цифрового микроскопа представлены в таблице 2.

Таблица 2. Микрофотографии подошв нароста, полученные на цифровом микроскопе MET 1T

№	Режимы резания	Микрофотография
1	$V = 15 \text{ м/мин}$ $S_0 = 0,14 \text{ мм/об}$	
2	$V = 20 \text{ м/мин}$ $S_0 = 0,21 \text{ мм/об}$	
3	$V = 27,6 \text{ м/мин}$ $S_0 = 0,14 \text{ мм/об}$	

4	$V = 40 \text{ м/мин}$ $S_0 = 0,21 \text{ мм/об}$	
---	--	---

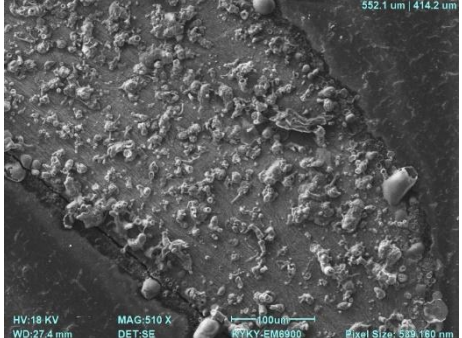
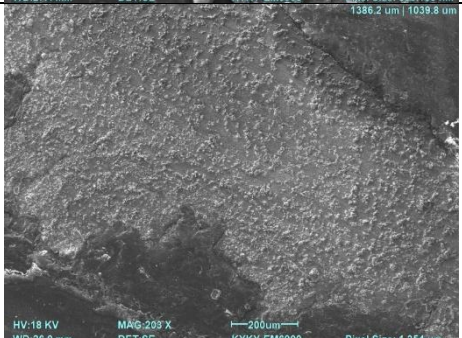
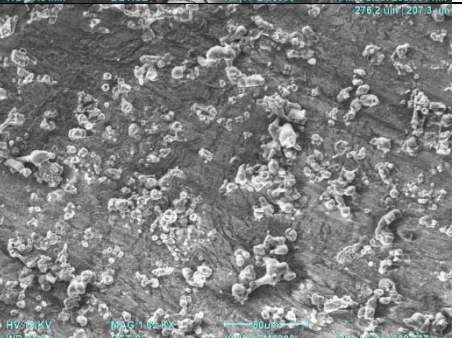
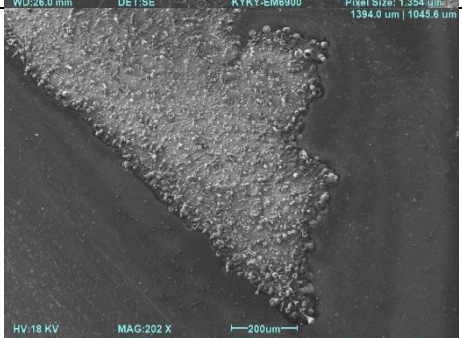
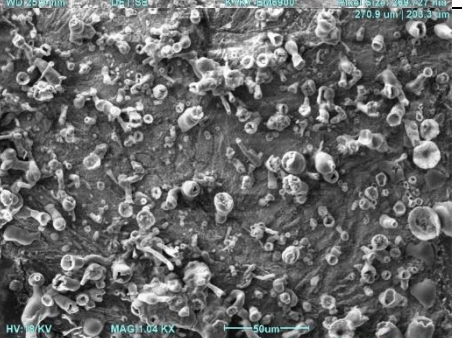
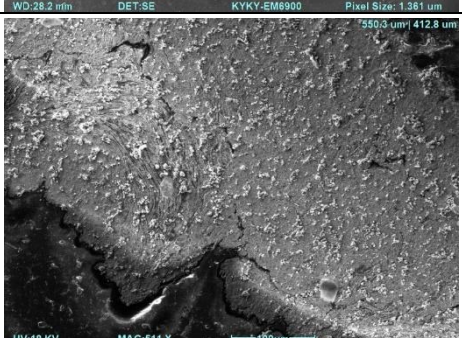
На изображениях явно просматриваются дугообразные или слоистые структуры, напоминающие слои материала, которые сформированы под воздействием значительных деформационных процессов. Такая текстура указывает на образование слоев из-за значительного пластического сдвига, что характерно для металлов, которые подверглись интенсивной механической обработке. Слои имеют явно выраженное направление, что может свидетельствовать о процессе пластической деформации. Направленность структур свидетельствует о сдвиговых напряжениях, вызванных механической обработкой. На нижней части изображений можно наблюдать участки с менее выраженной слоистостью и более размытой текстурой, что может говорить о присутствии различных участков, где пластическая деформация была менее выраженной. Эти области могут представлять собой участки с другими фазовыми составами или зернами, которые остались относительно неизменными в ходе обработки. Таким образом, микроструктура, представленная на изображении, имеет выраженную слоистую текстуру, которая свидетельствует о значительном уровне пластической деформации и сдвиговых напряжениях. Подобные структуры характерны для материалов, которые подверглись интенсивной механической обработке, например, точению или другим видам деформирующих процессов, при которых происходило сдвиговое деформирование и ориентация зерен в направлении приложения сил.

В структурах подошв нароста отчетливо видны вихревые моды деформации [6], возникающие в процессе адгезии, результатом чего является пластическая деформация контактных слоёв и диссипация внутренней энергии. Образовываются адгезионные

связи при сопутствующих структурных превращениях в очагах схватывания, которые приводят к вырыву зерен карбида с поверхности режущего инструмента (пластины).

Микрофотографии с электронного микроскопа WIN SEM A6000 представлены в табл. 3.

Таблица 3. Микрофотографии подошв нароста, полученные на электронном микроскопе WIN SEM A6000

№	Режимы резания	Микрофотография	
1	V = 15 м/мин S ₀ = 0,14 мм/об		
2	V = 20 м/мин S ₀ = 0,21 мм/об		
3	V = 27,6 м/мин S ₀ = 0,14 мм/об		
4	V = 40 м/мин S ₀ = 0,21 мм/об		

Изображения демонстрируют относительно неоднородную структуру поверхности с зернистой текстурой. Можно наблюдать наличие множества частиц разного размера и формы, которые равномерно распределены по поверхности. Частицы на поверхности различаются по форме и размерам. Некоторые из них представляют собой округлые агрегаты, в то время как другие имеют более неправильную и вытянутую форму. Подобные морфологические характеристики могут говорить о неоднородных условиях деформации материала. По масштабу можно предположить, что частицы имеют микронные размеры. Наличие сферических частиц может быть связано с присутствием оксидов железа, которые образуются на поверхности при воздействии воздуха на высоких температурах. В этом случае частицы могут быть продуктами абразивного износа и возникать вследствие схватывания при контакте стружки с инструментом. Таким образом, микроструктура на изображении указывает на наличие фазовых и механических неоднородностей, вызванных как внешними воздействиями (механическая обработка), так и внутренними (структурные изменения, связанные с фазовыми переходами и диффузионными процессами).

На структуре видны вихревые моды деформаций, а также многочисленные включения различных форм. Дополнительно был проведен спектральный анализ включений (рис. 6), который показал наличие частиц кислорода, железа и кобальта на поверхности.

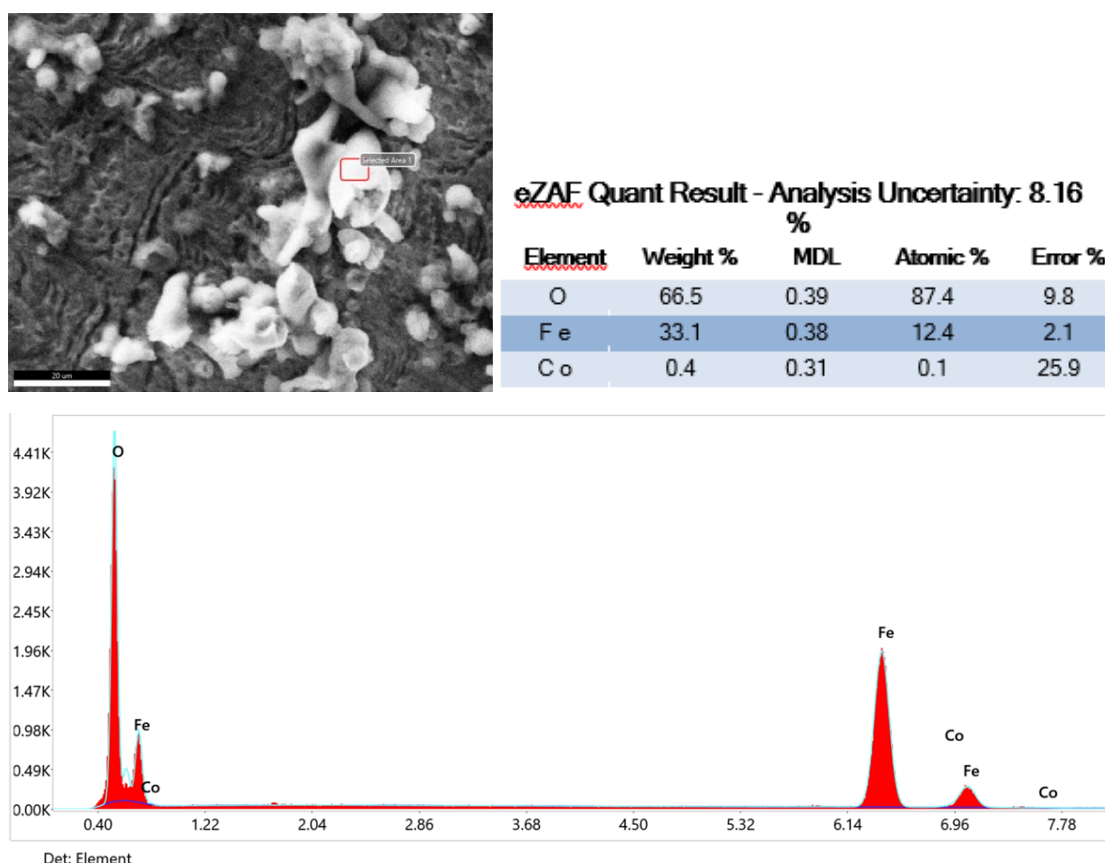


Рисунок 6. Результаты спектрального анализа образца

Таким образом, с помощью спектрального анализа установлено, что ювенильные поверхности (т.е. не окисленная и ещё не взаимодействовавшая с атмосферой) в зоне подошвы нароста, образующиеся в процессе трения при лезвийной

обработке, активно участвуют в процессе образования вторичных структур, таких как оксида железа (Fe_2O_3) и кобальта (Co). Окисные пленки железа образуются в следствии взаимодействия частиц с воздухом. Кобальт на поверхности подошвы нароста говорит об адгезионном износе режущего инструмента. Под воздействием больших удельных давлений вследствие стружкообразования зерна карбида оголяются, раскачиваются, связь между ними ослабевает и частицы вырываются с поверхности пластины вместе с наростом.

7. Заключение

Нарост образуется из-за адгезии обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента и этому способствуют ювенильная прирезцовая поверхность, довольно высокая температура в зоне контакта (от 200 до 500 °C) и удельные давления, оттого нарост имеет слоистую структуру. Слоистость и неоднородности на изображениях микроструктуры являются следствием развития деформационных полос — участков, в которых происходило перераспределение материала под воздействием нагрузки. На подошве нароста видны вихревые моды деформации, которые способствуют раскачиванию частиц твердого сплава и их вырыву с поверхности режущего инструмента (пластины).

Пути минимизации наростообразования:

1. Оптимизация режимов резания: увеличение скорости резания до области, в которой отсутствует наростообразование.
2. Правильный выбор инструментальных материалов: изменение геометрии режущей части, использование инструментов с износостойкими наноструктурными покрытиями (AlTiN, AlCrN и др.), которые обладают повышенной стойкостью к адгезии. Применение твердых сплавов с низким коэффициентом трения (со слабыми интерметаллическими связями между стружкой и инструментом).
3. Применение смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ): применение эффективных СОЖ снижает температуру в зоне резания и уменьшает трение, предотвращая формирование нароста.

ЛИТЕРАТУРА

1. Материаловедение и технология металлических, неметаллических и композиционных материалов: учебник / А. М. Адашкин, А. Н. Красновский. — М.: ФОРУМ: 2018. — 400 с. — (Высшее образование: Бакалавриат).
2. Древаль Алексей Евгеньевич, Лужанский Максим Сергеевич Наростообразование и работоспособность режущего инструмента // Известия вузов. Машиностроение. 2012. №12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/narostoobrazovanie-i-rabotosposobnost-rezhushchego-instrumenta> (дата обращения: 18.11.2024).
3. Полетика Михаил Федорович Микроструктура и микротвердость в зоне резания при работе резцом с фаской // Известия ТПУ. 1957. №. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mikrostruktura-i-mikrotverdost-v-zone-rezaniya-pri-rabote-reztsom-s-faskoy> (дата обращения: 18.11.2024).
4. Грановский Г. И., Грановский В. Г. Резание металлов. — М.: Высшая школа, 1985. — 304 с.
5. Научные основы управления микро- и макроструктурой металла заготовок, полученных аддитивным выращиванием, путем послойного нано- и дисперсного модифицирования для повышения механических характеристик изделий: монография /

Кабалдин Ю. Г. – Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2024. – 193 с.

6. Кабалдин, Ю. Г. Влияние пластической неустойчивости приконтактных слоев стружки на механизм изнашивания твердосплавного инструмента / Ю. Г. Кабалдин, А. А. Башков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 10(751). – С. 89-95. – DOI 10.18698/0536-1044-2022-10-89-95. – EDN RDTIUF.

7. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.

Поступила в редколлегию 10.03.2025 г.