

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 620.178.162:621.9.02

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-114-121



СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ТВЕРДЫМ СПЛАВОМ В УСЛОВИЯХ НАРОСТООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ

Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Башков А.А., Рябов Д.А., Акулова А.А.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Статья посвящена исследованию структурных изменений, происходящих в приконтактных слоях углеродистых сталей при трении с твёрдым сплавом. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью понимания процессов, происходящих в зоне трения, для разработки более эффективных методов смазки, снижения износа и повышения долговечности механизмов. Целью настоящего исследования явилось изучение механизма образования нароста как результат застойных процессов при резании. Для достижения поставленной цели были использованы экспериментальные методы, включающие электронно-микроскопические исследования, рентгеноструктурный анализ и другие методы. Научная новизна работы заключается в разработке особенностей механизма структурных изменений в приконтактных слоях сталей 20, 45, У8 при трении в процессе резания, влияющих на адгезию с твердым сплавом. Приведены результаты исследований структурных изменений в сталях при контактном взаимодействии с твердым сплавом. Показано, что в результате высоких скоростей деформирования и контактных нагрузок реализуется скоростной нагрев и формирование неравновесных структур, влияющих на адгезию с твердым сплавом. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов для разработки новых технологий, способных повысить износостойкость и долговечность механизмов, работающих в условиях трения с твёрдыми сплавами. Кроме того, результаты исследования могут быть полезны для разработки новых составов смазки и снижения износа режущих инструментов. Направление развития данной работы может включать дальнейшее исследование влияния различных износостойкихnanoструктурных покрытий на снижение коэффициента трения и износа режущего инструмента в процессе резания. Такие инструменты характеризуются повышенной твердостью поверхностного слоя и высокой теплостойкостью, обладают устойчивостью к окислительным и коррозионным процессам, демонстрируют низкую склонность к адгезии с обрабатываемым материалом, а также отличаются стабильностью прочностных характеристик.

Ключевые слова: прирезцовский слой, контактные нагрузки, твердый сплав, процесс резания, трение, адгезия, нарост, подошва нароста, скоростной нагрев, неравновесные структуры

© Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Башков А.А., Рябов Д.А., Акулова А.А., 2025

Для цитирования

Структурные изменения в углеродистых сталях при контактном взаимодействии с твердым сплавом в условиях наростообразования при резании / Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Башков А.А., Рябов Д.А., Акулова А.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 114-121. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-114-121>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

STRUCTURAL CHANGES IN CARBON STEELS DURING CONTACT INTERACTION WITH A HARD ALLOY UNDER CONDITIONS OF BUILD-UP FORMATION DURING CUTTING

Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Bashkov A.A., Ryabov D.A., Akulova A.A.

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article is devoted to the study of structural changes occurring in the contact layers of carbon steels during friction with a hard alloy. The relevance of this work is due to the need to understand the processes occurring in the friction zone in order to develop more effective lubrication methods, reduce wear and increase the durability of mechanisms. The purpose was to study the mechanism of build-up formation as a result of stagnant processes during cutting. To achieve this goal, experimental methods were used, including electron microscopy, X-ray diffraction analysis and other methods. The scientific novelty of the work is to develop the features of the mechanism of structural changes in the contact layers of 20, 45, U8 steels during friction while cutting, affecting adhesion to a hard alloy. The results of studies of structural changes in steels during contact with a hard alloy are presented. It is shown that as a result of high deformation rates and contact loads, high-speed heating and the formation of nonequilibrium structures affecting adhesion to a hard alloy are realized. The practical significance of the work lies in the possibility of using the results obtained to develop new technologies capable of increasing the wear resistance and durability of mechanisms operating under friction conditions with hard alloys. In addition, the results of the study may be useful for developing new lubricants and reducing wear of cutting tools. The direction of development of this work may include further study of the effect of various wear-resistant nanostructured coatings on reducing the coefficient of friction and wear of cutting tools during the cutting process. Such tools are characterized by increased hardness of the surface layer and high heat resistance, they are resistant to oxidative and corrosive processes, demonstrate low tendency for adhesion to the processed material and exhibit stable strength properties.

Keywords: cutting layer, contact loads, hard alloy, cutting process, friction, adhesion, build-up, the base of the build-up, high-speed heating, nonequilibrium structures

For citation

Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Bashkov A.A., Ryabov D.A., Akulova A.A. Structural Changes in Carbon Steels During Contact Interaction with a Hard Alloy Under Conditions of Build-Up Formation During Cutting. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 114-121. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-114-121>

Введение

При резании пластичных металлов на передней поверхности режущего инструмента образуется клиновидное тело-нарост. Согласно литературным данным, образование застойных явлений (нароста) при резании связывают с трением между стружкой и передней поверхностью инструмента. Изучению механизмов трения и образования застойных явлений при резании посвящены работы [1-6].

С позиций термодинамики неравновесных систем [7, 8] при резании работа трения A_T расходуется на запасание внутренней энергии ΔU_d и выделение тепла Q :

$$A_T = \Delta U_d + Q, \quad (1)$$

где A_T – работа трения, Дж; ΔU_d – энергия упругой деформации, Дж; Q – тепло, Дж.

Уравнение (1) основывается на первом и втором законах термодинамики [7, 8].

На трение при резании оказывают влияние множество факторов, включая физико-механические свойства обрабатываемого материала и инструмента, параметры режима резания (скорость V , подача S , глубина резания t , толщина среза a), геометрию режущего инструмента, наличие смазочно-охлаждающих жидкостей.

Согласно [1], коэффициент трения при резании можно также определить из соотношения

$$\mu = \frac{q_F}{q_N} = \frac{\text{const}}{q_N}, \quad (2)$$

где q_F – удельная сила трения, Н/м²; q_N – удельное давление на передней поверхности инструмента, Н/м².

Параметры q_N и q_F являются самостоятельными контактными характеристиками, зависящими от разных факторов: удельная сила трения складывается из силы пластического сдвига в контактном слое, а удельное давление есть функция относительной длины контакта C/a .

На рис. 1 представлена схема, иллюстрирующая двухзонную модель трения стружки с передней поверхностью инструмента [1, 12]. В этой связи различают длину пластического контакта стружки с передней поверхностью инструмента $C_{\text{пл}}$ (зона I) и длину контакта, где реализуется внешнее трение стружки с инструментом $C_{\text{вн}}$ (зона II).

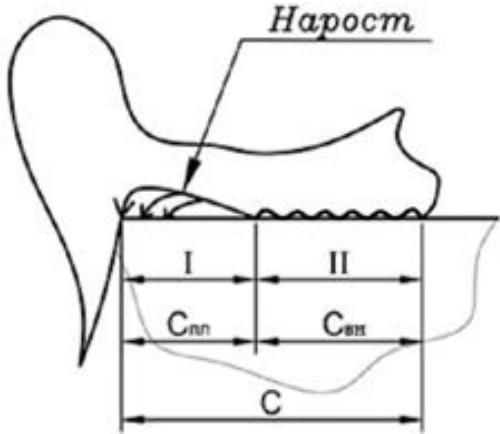


Рис. 1. Двухzonная модель трения при резании и формирование нароста на передней поверхности инструмента в зоне пластического контакта $C_{\text{пл}}$ (зона I)

Fig. 1. Two-band model of friction during cutting and the build-up formation on the front surface of the tool in the plastic contact zone of the C_{pl} (zone I)

Нарост имеет слоистое строение. Считается, что вершина нароста является неустойчивой, так как она формируется за счет сил когезии обрабатываемого материала. Поэтому, периодически срезаясь, нарост отрицательно влияет на шероховатость обработанной поверхности. На рис. 2 представлено изображение передней поверхности инструмента с частицами обрабатываемого металла на некотором удалении от режущего лезвия. Эти частицы остаются на поверхности режущего инструмента после сдвига нароста.

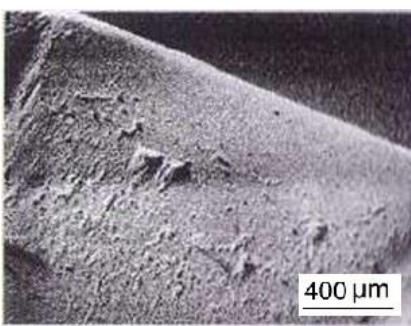


Рис. 2. Макроизображение передней поверхности инструмента с частицами металла после сдвига нароста ($\times 50$)

Fig. 2. Macroimage of the front surface of the tool with metal particles after the build-up is shifted ($\times 50$)

На рис. 3 приведена схема распределения контактных напряжений σ_N и τ_F , а также формирование застойных явлений на участке C контакта стружки с инструментом и показана начальная фаза затормаживания частиц обрабатываемого материала в конце пластического контакта $C_{\text{пл}}$ [11].

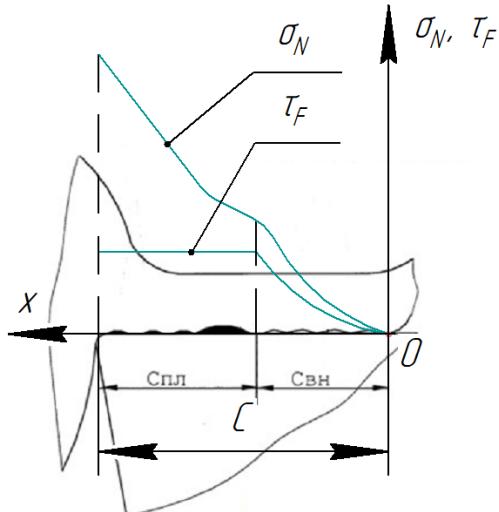


Рис. 3. Схема распределения контактных напряжений σ_N и τ_F и формирование застойных явлений на участке контакта C стружки с инструментом

Fig. 3. Diagram of the distribution of contact stresses σ_N and τ_F and the formation of stagnation phenomena along the length of the chip's contact C with the tool

Для каждого обрабатываемого материала удельная сила трения q_F постоянна [1] (инвариантна к условиям резания), поэтому коэффициент трения зависит только от среднего удельного контактного давления q_N . Инвариантность q_F к условиям резания связывается с достижением обрабатываемого металла в прирезцовых слоях стружки предельной степени деформации [12]. Видно, что напряжения σ_N максимальны вблизи режущего лезвия. Касательные τ_F напряжения на участке пластического контакта $C_{\text{пл}}$ постоянны и снижаются на участке упругого контакта $C_{\text{вн}}$, где реализуется внешнее трение.

Считается, что именно концентрация σ_N и τ_F вблизи режущего лезвия обуславливает образование нароста (застойной зоны) на режущем лезвии. Следует отметить, что формирование нароста и его устойчивость при резании до настоящего времени все еще мало изучены. В частности, возникает вопрос, почему первичные очаги затормаживания возникают не на режущем лезвии, где контактные напряжения максимальны, а на некотором удалении от режущего лезвия (см. рис. 2).

Материалы и методы исследования

Процесс резания проводился в условиях свободного резания (в процессе резания работает только главная режущая кромка). Предварительно на заготовках диаметром $\varnothing 50$ мм были нарезаны пояски шириной 2 мм. В качестве режущего инструмента применялся твердосплавный резец с пластиной ВК8 (сплав вольфрамовой группы). В качестве обрабатываемых материалов использовались углеродистые стали 20, 45 и У8. Режимы резания: $V = 20\text{--}50$ м/мин, $S_0 = 0,2$ мм/об, $t = 2$ мм. Параметры режущей пластины: главный угол в плане $\phi = 55^\circ$, задний угол $\alpha = 7^\circ$, передний угол $\gamma = 0^\circ$, радиус при вершине $r = 0,3$ мм. Способ крепления – прижим прихватом сверху.

Обработка выполнялась на токарно-винторезном станке 1К62 с закреплением заготовки в центрах. Пояски срезались твердосплавным резцом с поперечной подачей на различных режимах резания. Обработка проводилась без применения смазочно-охлаждающей жидкости.

Для исследования подошвы нароста был проведен микроструктурный анализ на цифровом микроскопе MET1T и растровом электронном микроскопе WIN SEM A6000 с EDS-спектрометром. Оценка твер-

дости нароста проводилась с помощью твердомера ИТВ-1-П-МС.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 4 представлены микроструктуры подошв наростов из стали 20 и исходная структура этой стали. Установлено, что исходное структурное состояние стали 20 в поверхностных слоях при контактировании со сплавом ВК8 при резании изменяется. На подошвах наростов формируется новое структурное состояние, отличное от исходного.

В начальной части подошвы наблюдается структура отпущеного мартенсита стали, представленная трооститом отпуска, за которой следуют вытянутые зерна перлита. В конечной части подошвы идентифицируются области чистого феррита (α -Fe).

На рис. 5 представлена зависимость микротвердости HV0,01 по длине подошвы нароста из стали 20 при различных скоростях V контактного взаимодействия с твердым сплавом. Видно, что наибольшая микротвердость наблюдается в начале подошвы нароста. Феррит в конце подошвы нароста является более пластичным и имеет наименьшую микротвердость.

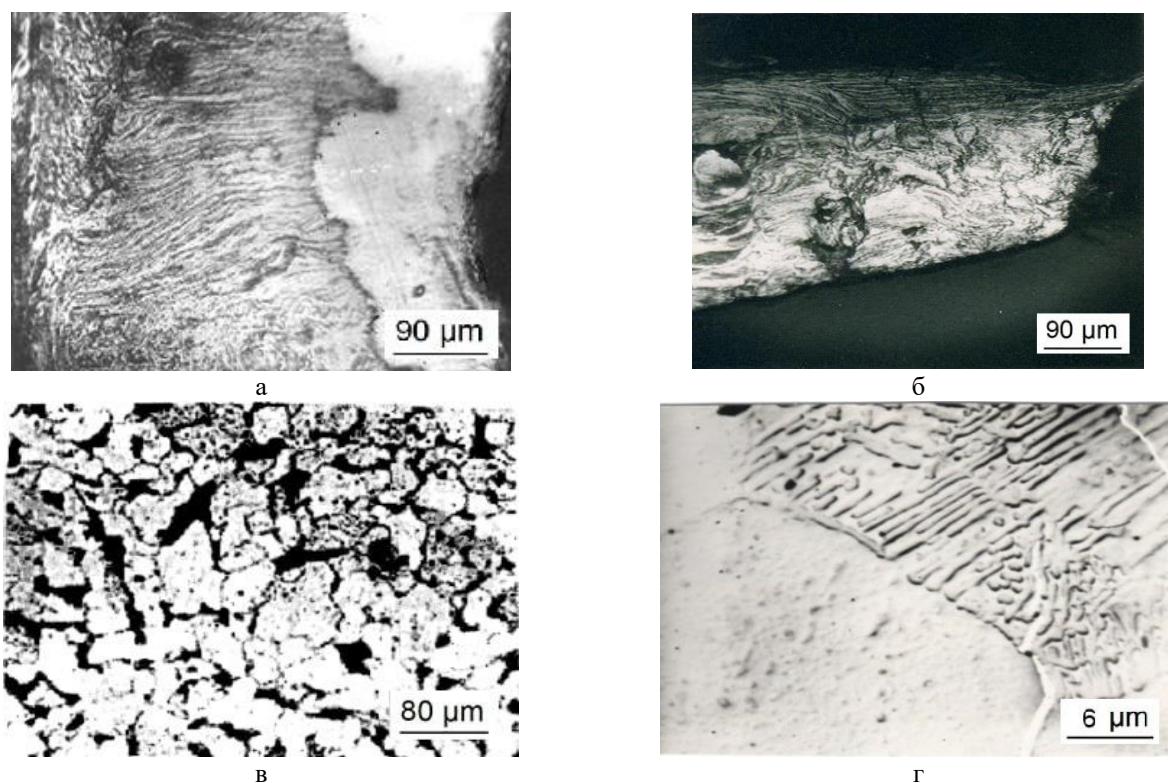


Рис. 4. Микроструктура стали 20: а – подошва нароста при $V = 15$ м/мин ($\times 200$); б – при $V = 40$ м/мин ($\times 200$); в – исходная структура ($\times 300$); г – исходная структура ($\times 3000$)

Fig. 4. Microstructure of 20 steel: a is the base of the build-up at $V=15$ m/min ($\times 200$); б is at $V=40$ m/min ($\times 200$); в is the initial structure ($\times 300$); г is the initial structure ($\times 3000$)

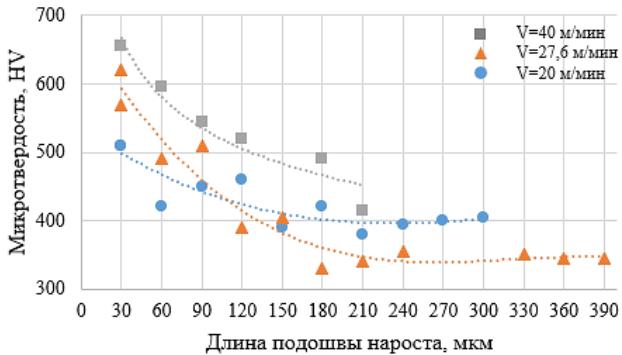


Рис. 5. Зависимость микротвердости HV_{0,01} по длине подошвы нароста при резании стали 20 на различных скоростях обработки:
 $S_0 = 0,2$ мм, $t = 2$ мм

Fig. 5. Dependence of the microhardness HV_{0,01} along the length of the build-up base when cutting 20 steel at various processing speeds:
 $S_0 = 0,2$ mm, $t = 2$ mm

На рис. 6 представлена структура подошвы нароста из стали 45, где видно, что подошву нароста формируют мелкомасштабные заторможенные вихревые структуры, которые наблюдаются в основном в конце подошвы нароста.

При резании стали У8 по длине подошвы обнаруживается структура, состоящая из зернистого пер-

лита с неравномерным распределением феррита и цементита (рис. 7, а, б) [11]. Далее на подошвах проводилась дополнительная термообработка—отпуск и измерялась микротвердость. На рис. 7, в, г представлены микроструктуры подошв наростов при резании стали У8 после ТО.

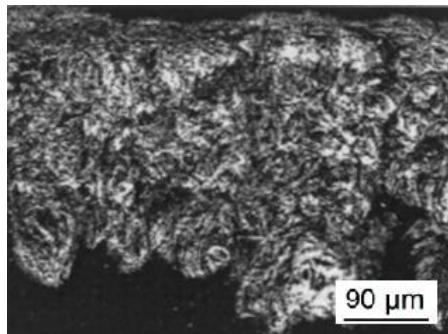
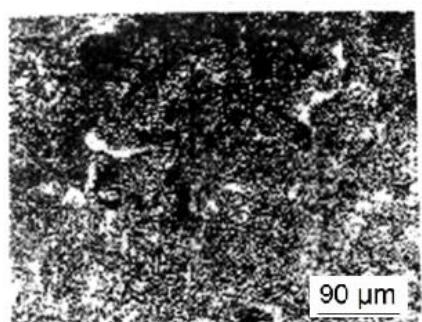
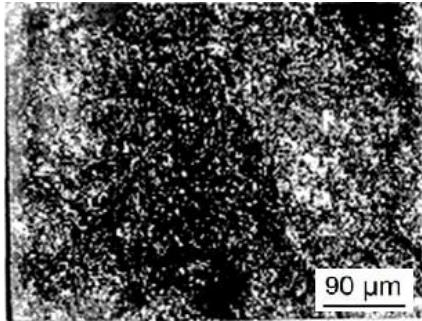


Рис. 6. Микроструктура подошвы нароста при резании стали 45: $V = 30$ м/мин ($\times 200$)
Fig. 6. Microstructure of the base of the build-up during cutting of 45 steel: $V = 30$ m/min ($\times 200$)

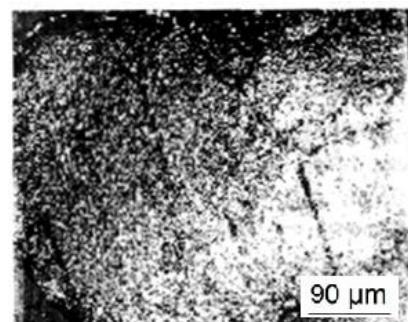
С увеличением скорости резания происходит окончательное образование зернистого перлита (рис. 7, в, г). Частицы сфероидизированного цементита, которые наблюдались в микроструктуре на рис. 7, а, равномерно распределены в ферритной матрице.



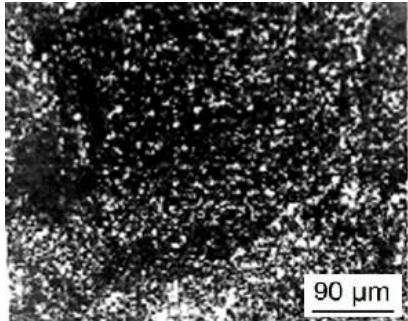
а



б



в



г

Рис. 7. Микроструктура стали У8 ($\times 200$): а – в исходном состоянии; б – подошва нароста; в – отпуск подошвы нароста при $T = 300^\circ\text{C}$; г – отпуск подошвы нароста при $T = 500^\circ\text{C}$

Fig. 7. Microstructure of U8 steel ($\times 200$): a is in the initial state; б is the base of the build-up; в is annealing of the base of the build-up at $T = 300^\circ\text{C}$; г is annealing of the base of the build-up at $T = 500^\circ\text{C}$

С целью изучения причин зависимости коэффициента HV0,01 от температуры отпуска были представлены температурные зависимости микротвёрдости, измеренной вдоль подошв наростов. Анализ данных зависимостей свидетельствует о том, что, аналогично процессу резания стали 20 при различных скоростях, вдоль подошв наростов, сформированных из стали У8, наблюдаются зоны с различными структурами, значениями микротвёрдости и, как следствие, пластичности.

На рис. 8 приведены зависимости HV0,01 от температуры отпуска нароста в вакуумной установке. Установлено, что при нагреве происходит снижение микротвёрдости подошвы нароста до исходной HV = 400 МПа, при этом наблюдается восстановление структуры стали до начального состояния.

Неравновесные структуры, которые являются результатом быстрой закалки и отпуска, при дальнейшем резании, в результате разогрева, возвращаются в исходное состояние (см. рис. 7). Нарост периодически срезается и процесс образования новых неравновесных структур на подошвах нароста вновь повторяется.

Образование неравновесных структур быстрой закалки в условиях острой локализации деформации и градиентов температур при трении в условиях резания следует рассматривать как фазовый переход с образованием новых диссипативных структур в ре-

зультате самоорганизации [11] контактных поверхностей. Анализ показывает, что более пластичные структуры (см. рис. 8) всегда формируются в конце подошвы нароста, обеспечивая более прочную адгезионную связь обрабатываемого металла с твердым сплавом. В этой связи были проведены исследования химического состава подошв наростов с использованием спектрального анализа (рис. 9).

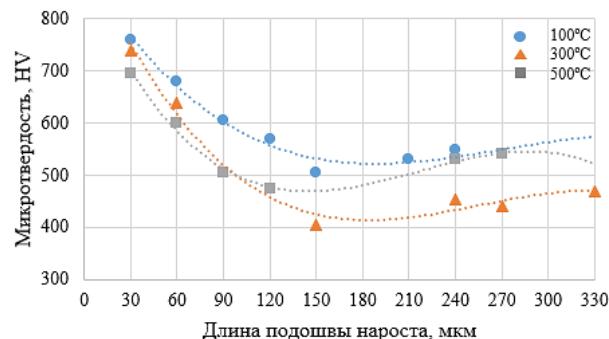


Рис. 8. Зависимость микротвердости HV0,01 по длине основания нароста из стали У8 от температуры отпуска

Fig. 8. Dependence of the microhardness HV0,01 along the length of the build-up base of U8 steel on the annealing temperature

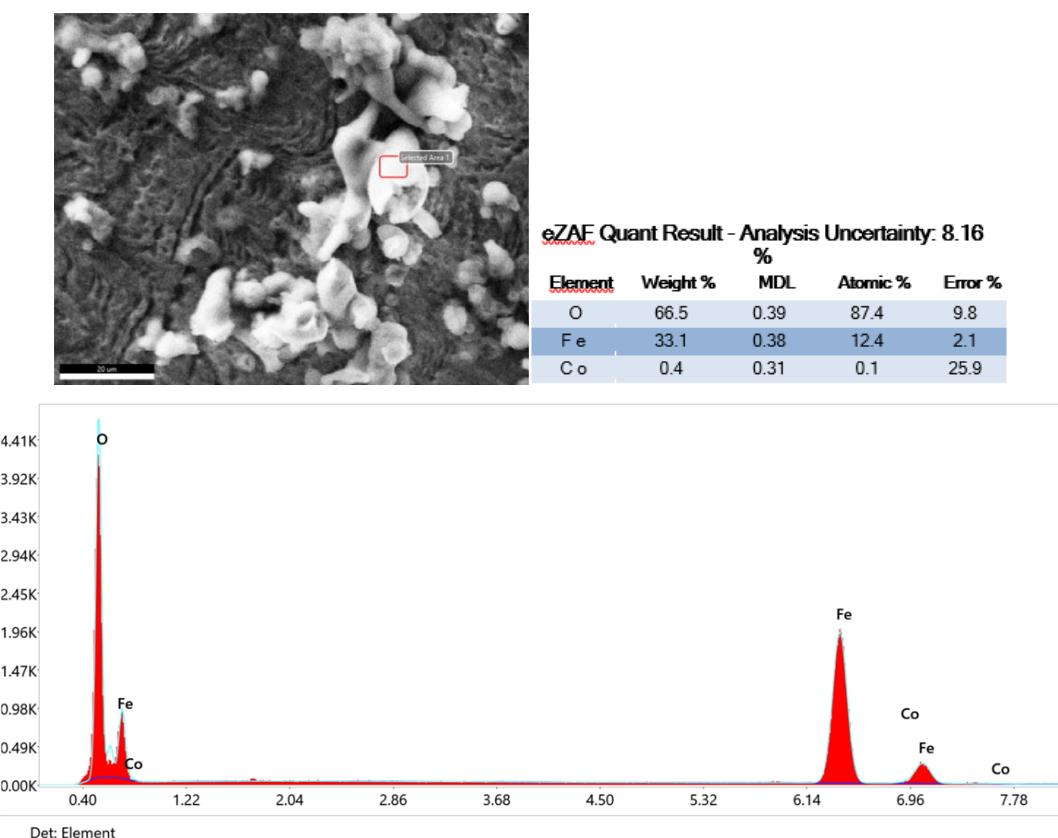


Рис. 9. Результаты спектрального анализа подошвы нароста
Fig. 9. The results of spectral analysis of the base of the build-up

Установлено, что на подошве нароста выявляются оксиды железа и частицы кобальта. Таким образом, адгезия между инструментальным материалом и железом, составляющая основу сталей, осуществляется прежде всего с более пластичной структурной составляющей твердых сплавов-кобальтом [10]. Как отмечалось выше, наиболее интенсивно адгезия, с образованием частиц металла на поверхности твердого сплава после сдвига тела нароста (см. **рис. 2**), происходит с более пластичными вторичными структурами (ферритом) подошвы нароста, которая формируется при структурных превращениях в ее конце (см. **рис. 1**). Адгезионные процессы (см. **рис. 2**) обусловлены вихревыми модами деформации при наличии высоких степеней деформации (см. **рис. 6**) [11].

Заключение

Анализ показывает, что за время нахождения частиц металла из стали 20 в приконтактных слоях стружки менее чем за 10^{-4} с температура нагрева превышает температуру плавления стали. Реализуются $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения. Далее происходит закалка и образуется мартенсит, после чего реализуется отпуск и образуется троостосорбитная структура. Кроме того, можно отметить, что в прирезцовых слоях наблюдается интенсивная диффузия углерода в направлении режущего лезвия, что подтверждается формированием значительной области чистого феррита, как показано на **рис. 4**.

Вопрос о механизме образования γ -фазы в углеродистой стали является одним из важнейших в теории фазовых переходов. В работах [8, 9, 11] указывается, что $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения при нагреве с большими скоростями делает возможным образование аустенита даже с малым содержанием углерода без притока извне за счет сегрегации его по границам феррита. Причем возможно и направленное выделение углерода не только из феррита, но и цементита.

Однако описанные выше неравновесные структуры при трении в условиях резания (см. **рис. 4, 6, 7**), на наш взгляд, обусловлены как градиентом температуры по длине контакта стружки с инструментом, так и распределением контактных напряжений при обработке того или иного материала. Экспериментальные данные (см. **рис. 4, а**) свидетельствуют об аномальном массопереносе и микродиффузии на достаточно большие расстояния (> 1 мкм) за период времени, равный долям секунды (10^{-4} с).

Таким образом, в отличие от скоростного лазерного нагрева [8], фазовые превращения при трении в условиях резания реализуются как при скоростном нагреве, так и при больших давлениях и градиенте температур.

Список источников

1. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956. 367 с.
2. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985. 304 с.
3. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
4. Мокрицкий Б.Я. Особенности лезвийной механической обработки труднообрабатываемых материалов: учеб. пособие. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 97 с.
5. Гуляев А.П., Гуляев А.А. Металловедение: учебник для вузов. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Альянс, 2023. 722 с.
6. Astakhov V., Shvets S. The assessment of plastic deformation in metal cutting // Journal of Materials Processing Technology. 2004, no. 146, pp. 193-202.
7. Study of Phase Transformations and Interface Evolution in Carbon Steel under Temperatures and Loads Using Molecular Dynamics Simulation / Wen C., Li Z., Wu H., Gu J. // Metals. 2024, no. 14, p. 752.
8. Jiao Y., Dan W., Zhang W. The strain-induced martensitic phase transformation of Fe-C alloys considering C addition: A molecular dynamics study // Journal of Materials Research. 2020, vol. 35, no. 14, pp. 1803–1816.
9. Новиков Н.В. Твердосплавные инструменты в процессах механической обработки / под ред. Н.В. Новикова и С.А. Клименко. Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, 2015. 368 с.
10. Утяшев Ф.З., Рааб Г.И., Валитов В.А. Деформационное наноструктурирование металлов и сплавов: монография. СПб.: Наукомкие технологии, 2020. 185 с.
11. Кабалдин Ю.Г. Самоорганизация и механизм трения при резании / Ю.Г. Кабалдин, А.А. Башков // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102, № 2. С. 167-173. DOI: 10.36652/0042-4633-2023-102-2-167-173. EDN QPEWOW.
12. Кабалдин Ю.Г. Нейронносетевое моделирование процессов трения при резании / Ю.Г. Кабалдин, А.А. Башков, С.В. Иванов, И.Д. Замураев // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2023. № 19. С. 52-58. DOI: 10.26160/2658-3305-2023-19-52-58. EDN MIXCZV.

References

1. Zorev N.N. Voprosy mekhaniki protsesssa rezaniya metallov [Questions of the metal cutting process mechanics]. Moscow: Mashgiz, 1956, 367 p. (In Russ.)
2. Granovsky G.I., Granovsky V.G. Rezanie metallov [Metal cutting]. Moscow: Vysshaya shkola, 1985, 304 p. (In Russ.)
3. Bobrov V.F. Osnovy teorii rezaniya metallov [Fundamentals of metal cutting theory]. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 344 p. (In Russ.)
4. Mokritskiy B.Ya. Osobennosti lezyinnoy mekhanicheskoy obrabotki trudnoobrabatyvaemykh materialov: ucheb. posobie [Features of blade machining of hard-to-process material: study guide]. Moscow; Vologda: Infra-Engineering, 2023, 97 p. (In Russ.)
5. Gulyaev A.P., Gulyaev A.A. Metallovedenie: uchebnik dlya vuzov. 8-e izd., pererab. i dop. [Metal science: textbook for universities. 8th edition, revised and expanded]. Moscow: Alliance, 2023, 722 p. (In Russ.)
6. Astakhov V., Shvets S. The assessment of plastic deformation in metal cutting. Journal of Materials Processing Technology. 2004;(146):193-202.

7. Wen C., Li Z., Wu H., Gu J. Study of Phase Transformations and Interface Evolution in Carbon Steel under Temperatures and Loads Using Molecular Dynamics Simulation. *Metals*. 2024;(14):752.
8. Jiao, Y., Dan, W. and Zhang, W. (2020) The strain-induced martensitic phase transformation of Fe-C alloys considering C addition: A molecular dynamics study. *Journal of Materials Research*. 2020;35(14):1803-1816.
9. Novikov N.V., Klimenko S.A. *Tverdosplavnye instrumenty v protsessakh mekhanicheskoy obrabotki* [Carbide tools in machining processes]. Kyiv: V. Bakul Institute for Superhard Materials, 2015, 368 p. (In Russ.)
10. Utyashev F.Z., Raab G.I., Valitov V.A. *Deformatsionnoe nanostrukturirovaniye metallov i splavov: monografiya* [Deformation nanostructuring of metals and alloys]. Mono-
- graph]. St. Petersburg: Science-intensive technologies, 2020, 185 p. (In Russ.)
11. Kabaldin Y.G., Bashkov A.A. Self-organization and the mechanism of friction during cutting. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering]. 2023;102(2):167-173. (In Russ.) DOI: 10.36652/0042-4633-2023-102-2-167-173. EDN QPEWOW.
12. Kabaldin Y.G., Bashkov A.A., Ivanov S.V., Zamuraev I.D. Neural network modeling of friction processes during cutting. *Transportnoe, gornoe i stroitelnoe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo* [Transport, mining and construction engineering: science and production]. 2023;(19):52-58. (In Russ.) DOI: 10.26160/2658-3305-2023-19-52-58. EDN MIXCZV.

Поступила 02.02.2025; принята к публикации 07.08.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 02/02/2025; revised 07/08/2025; published 30/09/2025

Кабалдин Юрий Георгиевич – доктор технических наук, профессор,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: uru.40@mail.ru. ORCID 0000-0003-4300-6659.

Аносов Максим Сергеевич – кандидат технических наук, доцент,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: anosov-maksim@list.ru. ORCID 0000-0001-8150-9332.

Башков Андрей Алексеевич – аспирант кафедры «Технология и оборудование машиностроения»,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: kicliu@mail.ru. ORCID 0000-0002-6658-0197.

Рябов Дмитрий Александрович – старший преподаватель, научный сотрудник,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: ryabovdm1996@gmail.com. ORCID 0000-0002-0486-598X.

Акулова Анна Александровна – инженер кафедры «Технология и оборудование машиностроения»,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: akulova.anna98@mail.ru.

Yuri G. Kabaldin – DrSc (Eng.), Professor,

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: uru.40@mail.ru. ORCID 0000-0003-4300-6659.

Maxim S. Anosov – PhD (Eng.), Associate Professor,

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: anosov-maksim@list.ru. ORCID 0000-0001-8150-9332.

Andrey A. Bashkov – Postgraduate Student at the Department of Technology and Equipment of Mechanical Engineering,

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: kicliu@mail.ru. ORCID 0000-0002-6658-0197.

Dmitrii A. Ryabov – Senior Lecturer, Researcher,

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: ryabovdm1996@gmail.com. ORCID 0000-0002-0486-598X.

Anna A. Akulova – Engineer of the Department of Technology and Equipment of Mechanical Engineering,

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: akulova.anna98@mail.ru.