

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-12-40-44

ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННО-AКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР В БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ P6M5

© Владимир Алексеевич Ким¹, Чингиз Февзиевич Якубов²,
Евгений Борисович Щелкунов¹, Елизавета Владимировна Самар¹

¹ Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия; e-mail: kmtnm@knastu.ru

² Крымский индустриально-педагогический университет, г. Симферополь. Россия.

*Статья поступила 26 февраля 2018 г. Поступила после доработки 8 июля 2018 г.
Принята к публикации 15 июля 2018 г.*

Адгезионные процессы — основная причина изнашивания металлорежущего инструмента. Идентификация адгезионно-активных поверхностных структур — микро- и мезомасштабных зон с повышенной плотностью дефектов кристаллического строения и высокой поверхностной энергией — возможна путем обработки поверхности соответствующими реактивами по аналогии с травлением металлографического шлифа. По степени затемнения (величине темно-серого оттенка) микроструктуры, выявленного травлением, оценивали уровень свободной энергии структурного образования. При этом степень темноты оттенка можно количественно описать и ранжировать с помощью цветовой сегментации. Большинство специализированных программ обработки металлографических изображений включают подобный алгоритм. Изображения исследовали, используя следующие показатели структурной организации адгезионно-активных центров: плотность микроструктурных объектов с высокой величиной свободной энергии, их относительная площадь поверхности, коэффициент темно-серого оттенка. Высокое значение коэффициента соответствует большей величине химического потенциала. Проводили сравнительный анализ характера распределения адгезионно-активных зон в поверхностных структурах сырой и закаленной быстрорежущей стали P6M5. Выявили, что закаленная структура содержит больше структурных элементов с высокой свободной энергией (или химическим потенциалом). Их распределение на поверхности образует локальные зоны повышенной твердости, обладающие высокой поверхностной энергией, а также адгезионно-активные центры, выступающие потенциальными очагами для образования прочных островковых наростов или зон формирования устойчивых адсорбционных пленок.

Ключевые слова: адгезия; трение; изнашивание; микроструктура; свободная энергия; цветовая сегментация.

STUDY OF ADHESION-ACTIVE SURFACE STRUCTURES IN P6M5 HIGH-SPEED STEEL

© Vladimir A. Kim¹, Chingiz F. Yakubov²,
Evgeniy B. Shchelkunov¹, Elizaveta V. Samar¹

¹ Komsomolsk-na-Amure state technical university, Komsomolsk-na-Amure, Russia; e-mail: kmtnm@knastu.ru

² Crimean industrial and pedagogical university, Simferopol, Crimea.

Received February 26, 2018. Revised July 8, 2018. Accepted July 15, 2018.

Adhesive processes are the main reason for wear of the metal-cutting tool. Adhesion-active surface structures (micro and meso-scale zones with increased density of defects having a crystal structure and high surface energy) can be identified by treating the surface with reactants by analogy with etching of a metallographic shlif. The level of free energy of the structural formation was estimated by the degree of darkening (dark gray color intensity) of the microstructure revealed by etching. The degree of darkening can be described and ranked quantitatively using color segmentation. Most specialized programs for metallographic image processing contain similar algorithm. The images were studied using the following indices of the structural arrangement of adhesion-active centers: the density of microstructural objects with a high value of the free energy; their relative surface area and dark gray color coefficient. A high value of the coefficient corresponds to the larger chemical potential. A comparative analysis of the character of distribution of adhesion-active zones in the surface structures of the crude and tempered P6M5 high-speed steel revealed that tempered structure contains more structural elements with high free energy (or chemical potential). Their distribution on the surface forms local zones of increased hardness, possessing

high surface energy, as well as adhesion-active centers acting as potential foci for the formation of strong islet growths or zones of formation of stable adsorption films.

Keywords: adhesion; friction; wear; microstructure; free energy; color segmentation.

При изнашивании металлорежущего инструмента доминируют адгезионные процессы, заключающиеся в формировании связей (схватывании) между обрабатываемым и инструментальным материалами. Разрыв таких связей инициирует взаимный массоперенос, который проявляется в виде наростов на рабочих поверхностях режущего клина и продуктов разрушения инструмента.

В структурном отношении центры адгезионной активности — микро- и мезомасштабные зоны с повышенной поверхностной энергией и высокой плотностью различных дефектов кристаллического строения (скоплений дислокаций, зон пересечений границ зерен, полей напряжений вокруг дисперсных частиц и др.). Плотность распределения и структурно-энергетические свойства адгезионно-активных центров (ААЦ) на поверхности определяют характер фрикционного взаимодействия, процессы трения и изнашивания.

ААЦ с повышенной свободной энергией можно идентифицировать травлением поверхности поликристаллических материалов соответствующими реактивами. Высокая плотность поверхностной энергии приводит к росту скорости химических реакций и формированию более развитого рельефа травленной поверхности. Для идентификации и анализа дислокационных структур используют метод химического декорирования [1, 2].

Изображение микроструктуры, получаемое с помощью металлографического микроскопа, формируется за счет теней и полутеней при определенном направленном освещении поверхности шлифа. Степень темно-серого оттенка соответствует глубине и развитости рельефа. Составляющие изображения с более темным оттенком (получаемые в «светлом поле») представляют микроструктуры с глубоким рельефом поверхности, что соответствует их высокому химическому потенциалу или повышенной плотности поверхностной (свободной) энергии [2].

Большинство программ обработки изображений микроструктур включают алгоритмы цветовой сегментации, позволяющие ранжировать объекты по глубине цветовых оттенков. Для описания уровня серого цвета в восьмиразрядном полутоновом изображении принято, что простой черный цвет имеет 0, а простой белый — 1 пиксель. Различная глубина серого оттенка обеспечивается сочетанием черных и белых цветов или комбинацией 0 и 1 в пределах 256 пикселей.

Для более точного ранжирования глубины темно-серого оттенка изображение раскладывается на цветовые каналы (красный, синий и зеленый) с последующей обработкой каждого из полученных изображений по алгоритму полутоновой сегментации [3]. При этом объекты, выявленные в области темно-серых оттенков с низким числом пикселей, — микроструктуры, подвергшиеся более активному и глубокому травлению, т.е. обладающие высокой исходной величиной свободной энергии [4].

Цель работы — исследование адгезионно-активных структур на поверхности инструментальной быстрорежущей стали Р6М5, выявленных травлением и обработкой цифровых изображений с помощью алгоритма цветовой сегментации.

Металлографические шлифы из сырой и закаленной стали Р6М5 готовили по традиционной методике на автоматическом станке AutoMet 250. Травление осуществляли 5 %-м раствором азотной кислоты в спирте. Микроструктуру фиксировали с помощью металлографического микроскопа Nikon MA200 ($\times 1000$). Изображения обрабатывали с помощью программы Image.Pro.Plus 5.1, включавшей коррекцию резкости и калибровку. Цветовую сегментацию проводили с разложением изображения на цветовые каналы. Затем выбирали тот из них, который обеспечивал наибольший диапазон оттенков (таковым чаще всего был красный канал, его в дальнейшем преобразовывали в серый цвет).

Шкалу глубин темно-серого цвета, представляющую диапазон 0 – 256 пикселей, делили на 10 равных интервалов. Коэффициент темно-серого оттенка вычисляли по формуле

$$K_{\text{ТСО}} = 1 - A_{\text{ср}}/256,$$

где $A_{\text{ср}}$ — среднее значение интервала в пикселях.

Поскольку повышенное значение коэффициента $K_{\text{ТСО}}$ соответствует большей величине свободной энергии микроструктурного объекта, такой объект сильнее подвергается химическому травлению и формирует более глубокий рельеф. Поэтому $K_{\text{ТСО}}$ можно рассматривать как условную характеристику свободной энергии или химического потенциала микроструктурного объекта. Границы рабочих интервалов, их средние значения в пикселях и коэффициент темно-серого оттенка приведены в таблице.

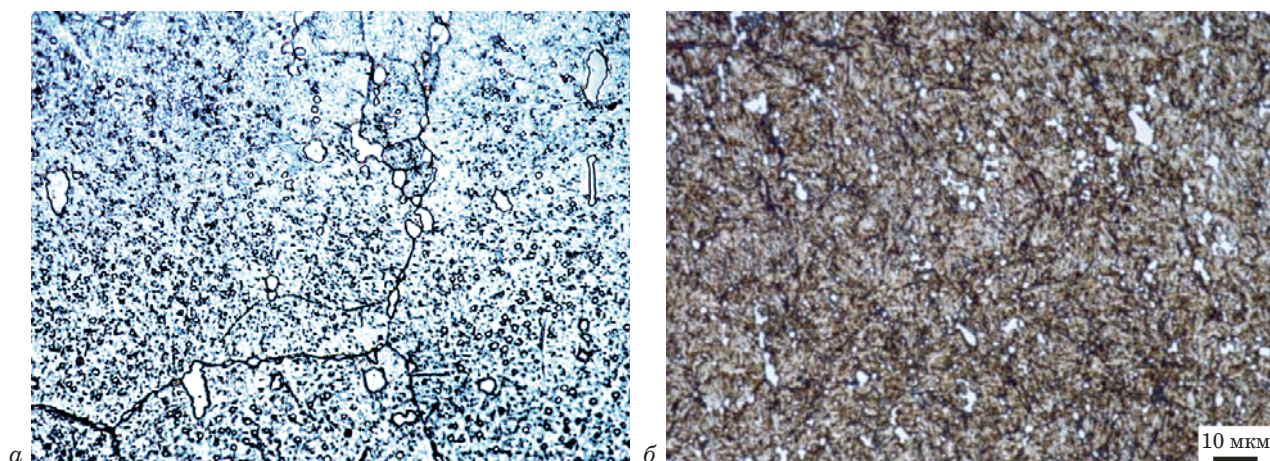


Рис. 1. Микроструктура быстрорежущей стали Р6М5 в сыром (а) и закаленном (б) состояниях

Изображение микроструктуры, зафиксированное в каждом интервале темно-серых оттенков, преобразовывали в так называемую контрастную маску, которую получали путем разделения серого цвета на простые белые и черные тона с сохранением среднего уровня серого оттенка. В итоге исходное изображение раскладывалось на несколько контрастных масок в соответствии с количеством интервалов разбиения всего диапазона серых оттенков. Интервалы со значениями больше 200 пикселей не фиксировали микроструктурные объекты, поэтому их в дальнейшем исключали из анализа.

По изображениям контрастных масок определяли количество (N) темных микрообъектов на определенном участке фотографии и площадь (F_i) каждого из них. Полученные значения использовали для вычисления плотности микроструктурных объектов (n) и их удельной площади ($f_{уд}$) [5, 6]:

$$n = N/F_{\phi}, \quad f_{уд} = \frac{1}{F_{\phi}} \sum_N F_i,$$

где F_{ϕ} — площадь участка металлографического шлифа на фотографии микроструктуры, в пределах которого вычисляли геометрические характеристики микроструктурных объектов.

На рис. 1 представлены фотографии микроструктуры исследуемой стали в сыром и закаленном состояниях. Видно, что структура сырой стали состоит из крупных зерен легированного

перлита, мелких карбидов глобулярной формы, равномерно распределенных по всему объему, и крупных карбидов неправильной формы, расположенных преимущественно по границам зерен.

В закаленной структуре слабо просматриваются границы исходных аустенитных зерен на фоне мартенсита закалки и мелких глобулярных карбидов. Большое количество точечных образований присутствует в обеих микроструктурах, но в закаленной их плотность ощутимо выше. Хорошо различимы области с повышенной концентрацией темных микроструктурных объектов. В структуре сырой стали по сравнению с закаленной такие области имеют большую площадь, но они слабее по степени темно-серого оттенка.

Микроструктурные составляющие, зафиксированные на контрастных масках, состоят из отдельных точечных образований, площадь которых составляет 0,003 – 0,01 мкм². Если эти образования отнести к объектам нулевого порядка мерности, то микроструктуры более высоких порядков представляют их упорядоченные комбинации.

Структуру материала можно характеризовать как объемно распределенную, а изображение представляет ее срез в плоскости металлографического шлифа. В этом случае составляющие микроструктуры теряют единицу мерности, т.е. ноль- и одномерные изображения в реальности одно- и двухмерные соответственно. Исключение составляют поля упругих напряжений в матрице

Границы интервалов темно-серых оттенков, A_{cp} и K_{TCO}

Интервал	1	2	3	4	5	6	7	8
Границы диапазона	0 – 25	26 – 50	51 – 75	76 – 100	101 – 125	126 – 150	151 – 175	176 – 200
A_{cp}	12	38	63	88	113	138	163	188
K_{TCO}	0,951	0,853	0,755	0,658	0,560	0,462	0,365	0,267

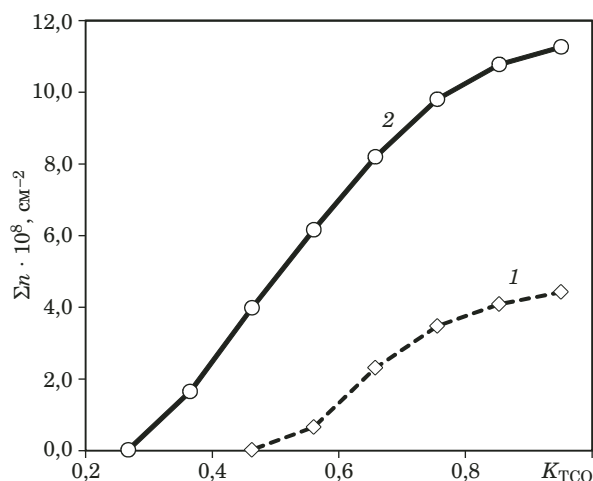


Рис. 2. Зависимость распределения плотности микро-структурных объектов (n) от коэффициента темно-серого оттенка ($K_{ТСО}$) для сырой (1) и закаленной (2) быстрорежущей стали Р6М5

вокруг мелких дисперсных частиц второй фазы при увеличении, соответствующих оптической металлографии. В действительности на изображениях микроструктур они остаются точечными объектами [7].

По изображениям точечных микроструктур невозможно выявить тип дефекта, но их сумма характеризует общее количество микро-структурных объектов, формирующих структурные образования с высокой свободной энергией. Поэтому по плотности микроструктурных объектов (n) можно судить о поверхностном распределении зон с повышенным химическим потенциалом — потенциальных центров адгезионной активности.

На рис. 2 представлены интегральные распределения плотности темных микроструктурных объектов сырой и закаленной микроструктур в зависимости от коэффициента $K_{ТСО}$ (максимальное значение интегральной кривой равно сумме темных структурных объектов, зафиксированных на одном снимке). В относительных величинах интегральное распределение — кумулятивная кривая.

Установили, что плотность темных микро-структурных объектов, обладающих высокой свободной энергией, в сырой стали соизмерима с плотностью дислокаций (10^8 см^{-2}). В закаленной она значительно ниже (плотность темных объектов — $\sim 10^9$, плотность дислокаций — $\sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$ [8]). Можно предположить, что в сырой стали ААЦ преимущественно — точечные концентраторы напряжений и выходы одиночных линейных дефектов на поверхность, а в закаленных структурах — множественные скопления различных микромасштабных дефектов кристаллического строения.

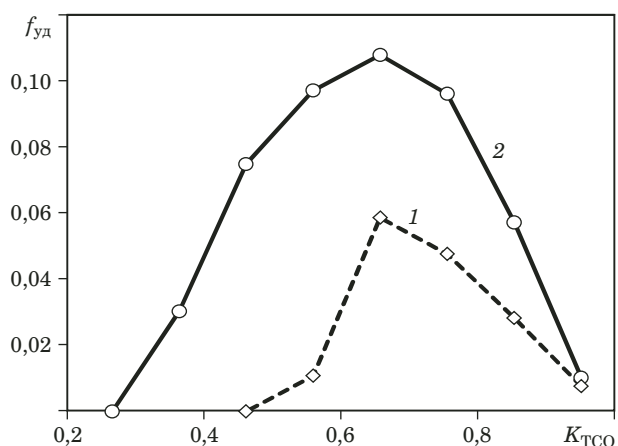


Рис. 3. Зависимость удельной площади микроструктурных объектов ($f_{уд}$) от коэффициента темно-серого оттенка ($K_{ТСО}$) для сырой (1) и закаленной (2) быстрорежущей стали Р6М5

На рис. 3 представлена зависимость удельной площади темных микроструктурных объектов от $K_{ТСО}$. Видно, что средняя площадь ААЦ и диапазон их рассеивания по степени темно-серого оттенка в сырой стали заметно ниже, чем в закаленной структуре. Диапазон изменения $K_{ТСО}$ структурных составляющих в закаленном состоянии более чем в 1,5 раза превышает сырой материал. Это означает, что свободная энергия потенциальных ААЦ на закаленной поверхности значительно выше, чем на сырой. Максимум распределения удельной площади приходится на один и тот же коэффициент $K_{ТСО}$ как для сырой, так и закаленной стали.

Таким образом, закаленная структура быстрорежущей стали Р6М5 содержит большое число структурных элементов с высокой свободной энергией, распределение которых на поверхности образует локальные зоны повышенной твердости. Сочетание в микроструктурном элементе высоких значений химического потенциала и стехиометрии обеспечивает его прочность и твердость, а при нарушении стехиометрии — повышенную величину поверхностной энергии.

Первую группу таких микроструктур составляют карбиды тугоплавких металлов, в большом количестве присутствующие в структуре стали [8], вторую — различные дефекты кристаллического строения. Обладая низкой химической активностью из-за высокой степени стехиометрии, микроструктуры первой группы практически не поддаются травлению, и на изображениях они представляются в виде светлых объектов [2]. Микроструктуры второй группы выявляются травлением, и именно они на поверхности создают локальные зоны с высокой поверхностной энергией — потенциальные ААЦ.

Мезомасштабные зоны повышенной адгезионной активности в процессах контактного взаимодействия при резании металлов могут проявлять себя по-разному. С одной стороны, это очаги для осаждения мелких фрагментов обрабатываемого материала в виде наливов и развития прочно закрепленных островковых наростов. С другой стороны, в этих зонах формируются устойчивые адсорбционные пленочные структуры, если в контактом процессе участвуют поверхностно-активные вещества.

Образующиеся устойчивые наросты на рабочих поверхностях режущего инструмента можно отнести к особой форме вторичных диссипативных структур, играющих буферную роль в контактных процессах и повышающих износостойкость режущего клина [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Вест А. Химия твердого тела. Теория и приложения. В 2 ч. / Пер. с англ. — М.: Мир, 1988. — 558 с.
2. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля — М.: Техносфера, 2004. — 384 с.
3. Претт У. Цифровая обработка изображений / Пер. с англ. — М.: Мир, 1982. — 480 с.
4. Ким В. А., Башков О. В., Попкова А. А. Методика цифровой обработки изображений микроструктуры алюминиевых сплавов в среде MATLAB / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 10. С. 34 – 40.
5. Kim V. A., Belova I. V., Boutin A. V. Kinetics of structural of hardened steel 15H5M during tempering / Modern materials and technologies. 2013. N 1. P. 126 – 131.
6. Ким В., Евдокимова Р., Золоторева С., Попкова А., Йошида М. Статистическая оценка количественной металлографии / Ученые записки КнАГТУ. 2013. № II-1(14). С. 76 – 82.
7. Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж., Оксогоев А. А. Синергетик и фракталы в материаловедении. — М.: Наука, 1994. — 383 с.
8. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. — М.: Metallurgiya, 1983. — 527 с.
9. Ким В. А., Якубов Ф. Я., Шхиртладзе А. Г. Мезомеханика процессов контактного взаимодействия при резании металлов. — Старый Оскол: ТНТ, 2017. — 244 с.

REFERENCES

1. West A. Solid State Chemistry and Its Application. — Moscow: Mir, 1988. — 558 p. [Russian translation].
2. Brandon D., Kaplan U. Microstructure of materials. Methods of research and control. — Moscow: Tekhnosfera, 2004. — 384 p. [Russian translation].
3. Prett U. Digital processing of image. — Moscow: Mir, 1982. — 480 p. [Russian translation].
4. Kim V. A., Bashkov O. V., Popkova A. A. Technique of digital processing of image of aluminum alloys among the MATLAB / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2013. Vol. 79. N 10. P. 34 – 40 [in Russian].
5. Kim V. A., Belova I. V., Boutin A. V. Kinetics of structural of hardened steel 15H5M during tempering / Modern materials and technologies. 2013. N 1. P. 126 – 131.
6. Kim V., Evdokimova R., Zolotorava S., Popkova A., Yoshida M. Statistical assessment of a quantitative metallography / Uch. Zap. KnAGTU. 2013. N II-1(14). P. 76 – 82 [in Russian].
7. Ivanova V. S., Balankin A. S., Bunin I. J., Oksogoev A. A. Synergetic and fractal in materials science. — Moscow: Nauka, 1994. — 383 p. [in Russian].
8. Geller U. A. Tool steel. — Moscow: Metallurgiya, 1983. — 527 p. [in Russian].
9. Kim V. A., Yakubov F. Ya., Shirladze A. G. Mesomechanics of processes of contact interaction at friction and cutting of metals. — Stary Oskol: TNT, 2017. — 244 p. [in Russian].