

УДК 53.539.8:53.539.25

СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ У8 ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ДЕФОРМИРУЮЩИМ РЕЗАНИЕМ

© 2020 г. О. М. Жигалина^{a, b, *}, А. Г. Дегтярева^{b, **}, Д. Н. Хмеленин^a, В. Н. Симонов^b

^aИнститут кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН,
Москва, 119333 Россия

^bМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005 Россия

*e-mail: zhigal@ns.crys.ras.ru

**e-mail: dega_70@mail.ru

Поступила в редакцию 15.11.2019 г.

После доработки 25.12.2019 г.

Принята к публикации 27.12.2019 г.

Проведено исследование структуры стали У8 после высокоскоростной обработки деформирующим резанием. Установлены фазовый состав и особенности структуры упрочненного поверхностного слоя, состоящего из отдельных областей (так называемых ребер), плотно прилегающих друг к другу. Методами оптической и электронной микроскопии в прирезцово-й зоне ребра обнаружены: феррит неравновесной формы и крупноигльчатый мартенсит с размерами кристаллов около 100 нм, паркетные мартенситоподобные структуры с шириной пластин десятки нанометров, а также кристаллы цементита различной дисперсности – от 10 до 100 нм. Такое неоднородное структурное состояние возникает в зоне ребра, прилегающей к резу во время обработки деформирующим резанием. Структура противоположной зоны ребра принципиально отличается и состоит из равноосных зерен феррита величиной ~500 нм с пограничными мелкими выделениями (предположительно, карбидов) размером 10–20 нм.

Ключевые слова: деформирующее резание, электронная микроскопия, фазовый состав, феррит, мартенситоподобная структура, наноцементит, микротвердость.

DOI: 10.31857/S1028096020060230

ВВЕДЕНИЕ

Распространение новых технологий, основанных на температурно-силовом воздействии на конструкционные материалы, обуславливает необходимость научных исследований, связанных со спецификой структурных и фазовых превращений при высокоскоростных методах поверхностного упрочнения. Такие методы, как правило, приводят к упрочнению не всего изделия, а только его поверхности. Тем не менее, именно свойства поверхности являются основополагающими для износостойкости, коррозионной стойкости, контактной выносливости, усталостной прочности и других эксплуатационных качеств материала.

Получаемые при высокоскоростных обработках поверхности, как правило, обладают уникальными свойствами, характеризуются высокой твердостью, их структура резко отличается от структуры основного металла, они плохо или совсем не травятся. Такие структуры образуются за счет нагрева поверхностного слоя выше температуры

фазового превращения перлит–аустенит, а быстрое охлаждения со скоростью, превышающей $V_{\text{крит}}$ (быстрый отвод тепла в сердцевину заготовки), обеспечивает протекание процессов закалки [1]. Структуры имеют специфические названия: белый слой, гарденит, белая полоса, зона вторичной закалки и так далее [2–6]. Для удобства из всего многообразия терминов выберем один и будем называть такую структуру белым слоем. По сравнению с мартенситом, полученным в результате стандартной закалки, повышенная твердость белого слоя объясняется возникновением бесструктурного мартенсита, когерентностью межфазных границ, концентрационной неоднородностью структуры, высокой дисперсностью и наличием нерастворенных карбидов [7–10].

Обобщая данные литературных источников о природе белого слоя, можно сказать, что для его получения требуется интенсивный нагрев с одновременной пластической деформацией и быстрый отвод тепла вглубь заготовки. Такие условия выполняются при обработке деформирующим ре-

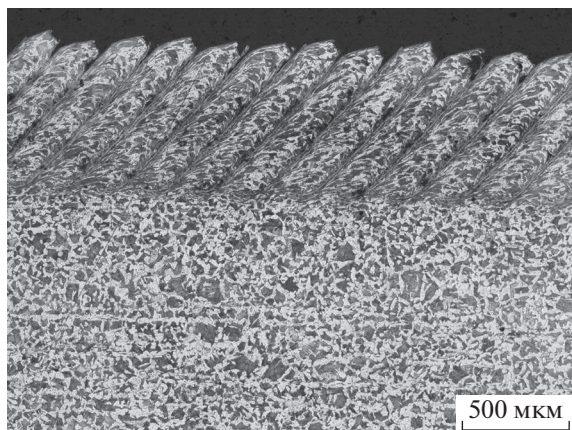


Рис. 1. Типичная оребренная поверхность стали (наклонные ребра без зазора, сталь 35).

занием [11], в результате которой может происходить закалочное упрочнение [12]. На поверхности заготовки (вала) образуется рельеф в виде наклонных ребер (рис. 1), плотно (без зазора) прилегающих друг к другу [13]. Эти ребра, образующиеся при резании, представляют собой не отделившуюся от заготовки стружку.

Ранее проведенные исследования [14] показали, что в результате деформирующего резания на оребренной поверхности в сталях можно наблюдать как деформированную структуру, так и структуры полной и неполной закалки. Было установлено, что полученное структурное состояние обеспечивает увеличение твердости обработанной поверхности материала втрое. Необходимо отметить, что структура в данном случае может определяться многими факторами, в том числе составом стали, выбранными параметрами режимов деформирующего резания. В этом отношении структурное состояние поверхности различных материалов и его роль в упрочнении практически не изучены. В связи с этим в настоящей работе проведено исследование фазового состава и структуры ребер, формирующихся в стали У8 при деформирующем резании, с целью выявления роли структурного фактора в упрочнении поверхности данного материала (данной марки стали).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве заготовки использовали стальной вал У8 диаметром 56 мм в состоянии поставки (отжиг на зернистый перлит). Обработку деформирующим резанием проводили на кафедре “Инструментальная техника и технологии” МГТУ им. Н.Э. Баумана в режиме: скорость резания $V_{рез} = 3.26$ м/с, подача $S = 0.05$ мм/об., припуск $t = 1$ мм.

Структуру и фазовый состав образцов изучали следующими методами. Металлографический анализ поверхности шлифов проводили с помощью микроскопа Olympus GX51 с увеличением до 1000 крат. Для выявления структуры поверхность шлифов подвергали травлению 4% раствором HNO_3 в C_2H_5OH . Микротвердость образцов измеряли автоматическим микротвердомером EMCO-TEST DuraScan-70 при нагрузке 100 г.

Изображения поверхности образцов получены с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) FEI Scios при ускоряющем напряжении 20–30 кВ в режиме регистрации вторичных электронов с использованием детектора Эверхарта–Торнли. Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), просвечивающая растровая микроскопия (ПРЭМ), энергодисперсионный анализ и дифракционный анализ выполнены с помощью микроскопа Tescan Osiris при ускоряющем напряжении 200 кВ. Полученные данные анализировали с использованием программ Digital Micrograph, JEMS. Образцы для ПЭМ-исследований вырезали ионным пучком в колонне растрового микроскопа FEI Scios.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 показана структура упрочненной поверхности стали У8, сформированная в процессе деформирующего резания. Хорошо видно, что обработка в вышеуказанном режиме привела к крайне неоднородной структуре ребра, что не наблюдалось ранее. Например, в [15] показано, что в стали 35 уменьшение подачи от 0.1 до 0.05 мм/об. приводит к гомогенной структуре ребра. Из прирезочной зоны (это часть подрезанного слоя, испытывающая интенсивное трение в контакте с инструментом) наблюдается так называемый бесструктурный слой, плохо поддающийся травлению и состоящий в основном из светлых гладких областей. Противоположная часть ребра (свободная зона) хорошо травится, а светлые области в ней почти отсутствуют. Однако, несмотря на принципиальную разницу между структурой прирезочной и свободной зон, их микротвердость отличается несущественно ($630 HV_{0.1}$ прирезочная зона и $550 HV_{0.1}$ свободная зона). Исходная микротвердость до обработки деформирующим резанием составляла $\sim 200 HV_{0.1}$.

На РЭМ-изображениях (рис. 2б, 3а) видна рельефная, хорошо протравленная поверхность свободной зоны и гладкая, почти без ямок, прирезочная зона. Для сравнительного анализа особенностей тонкой структуры, выявляемых методами ПЭМ, необходимо было вырезать ламели точно из каждой зоны. Для этого в режиме вторичных

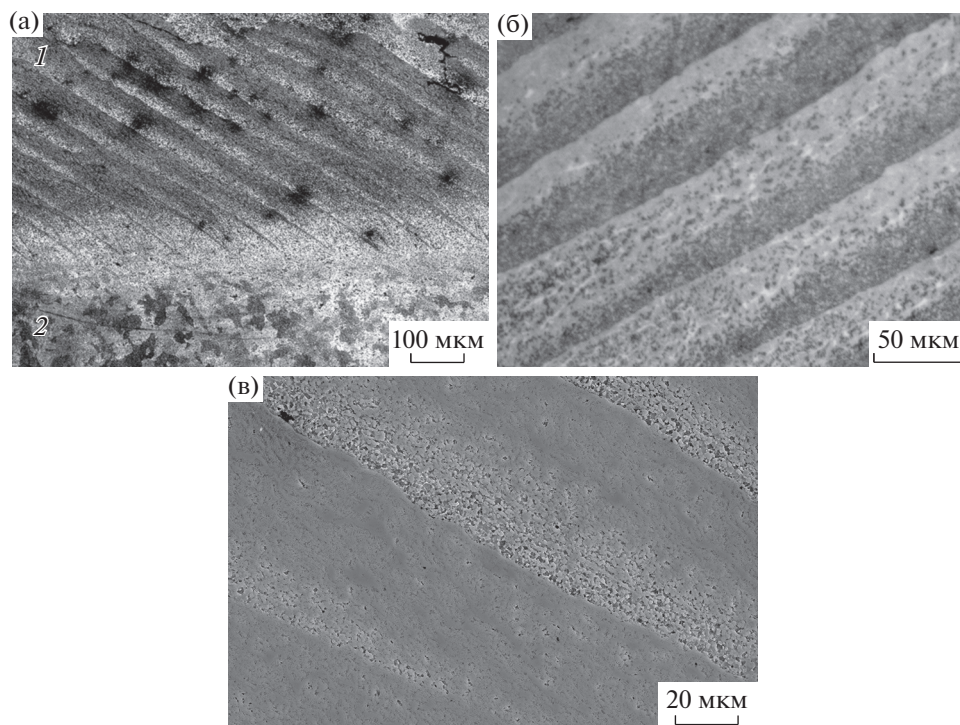


Рис. 2. Неоднородная структура упрочненной поверхности: а – общий вид (1 – ребра поверхностного слоя после деформирующего резания, 2 – объем, не затронутый обработкой); б, в – увеличенное РЭМ-изображение структуры отдельных ребер.

электронов были выбраны характерные участки из прирезцовой, так называемой бесструктурной, и протравленной свободной зоны. Места, из которых ионным пучком перпендикулярно поверхности образца были вырезаны ламели с полезной площадкой размером 7×7 мкм, отмечены черными горизонтальными линиями на рис. 3а.

Для ПЭМ-исследований ламели утоняли ионами галлия до толщины 50–70 нм. Отдельные небольшие участки ламелей утоняли до толщины 10–20 нм для изучения тонкой структуры с высоким разрешением. На рис. 3б, в представлены панорамные изображения структуры образцов, вырезанных из этих двух зон, полученные в ПЭМ. Исследования методами ПЭМ показали, что свободная зона ребра состоит из равноосных зерен размером 500 нм, а прирезцовая зона имеет сложную структуру. Интересно отметить, что микротвердость областей прирезцовой зоны составляет $900 HV_{0,1}$, что в полтора раза выше среднего значения по ребру ($\sim 600 HV_{0,1}$). ПЭМ-исследования выявили, что на участке с гладкими областями присутствуют зерна феррита неравновесной, произвольной формы размером в сотни нанометров (рис. 4). Кроме того, обнаружены мартенситоподобные участки с дисперсной паркетной структу-

рой с размером кристаллов несколько десятков нанометров (рис. 4в), а также пластинчатые выделения цементита разных размеров (рис. 5): крупные одиночные пластины шириной около 100 нм (рис. 5а) и мелкие пластины шириной 5–15 нм, растущие в виде “бахромы” на границах ферритных зерен (рис. 5б). Мелкие выделения цементита были визуализированы с помощью электронной микроскопии высокого разрешения (рис. 5). Анализ Фурье дифрактограмм, полученных от участков изображений высокого разрешения, и сопоставление с теоретическими электронограммами подтвердили, что нанопластины являются цементитом и их размер составляет несколько нанометров.

Структура образца, вырезанного из свободной зоны того же ребра, имеет принципиально другой вид. Наблюдаются только зерна феррита равноосной формы размером в сотни нанометров, без признаков мартенситной структуры и цементита (рис. 6а). Темнопольный анализ при большем увеличении отдельных зерен свидетельствует о наличии субструктуры. По границам зерен расположены мелкие выделения (предположительно, карбиды) размером в десятки нанометров (рис. 6б). Таким образом, обнаружено особое структурное

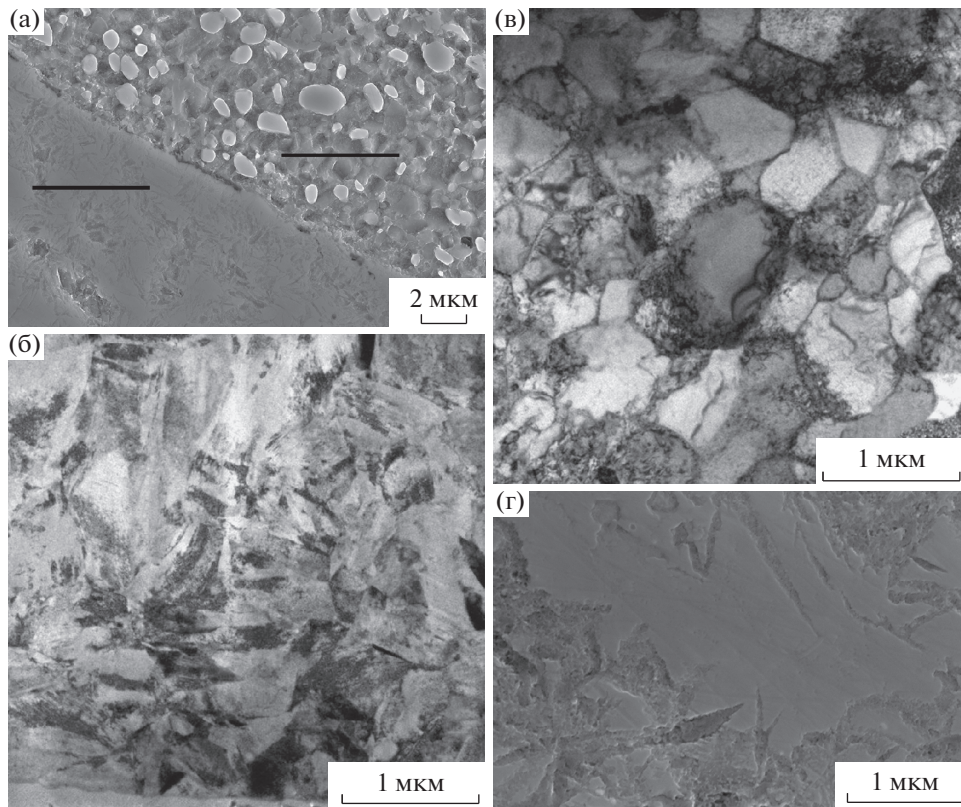


Рис. 3. РЭМ-изображение приграничной области прирезковой и свободной зон, черные линии показывают места, откуда были вырезаны ламели (а); ПЭМ-изображение структуры в поперечном сечении прирезковой (б) и свободной (в) зоны; увеличенное РЭМ-изображение бесструктурного участка и игольчатых кристаллов в прирезковой зоне (планарный вид поверхности образца) (г).

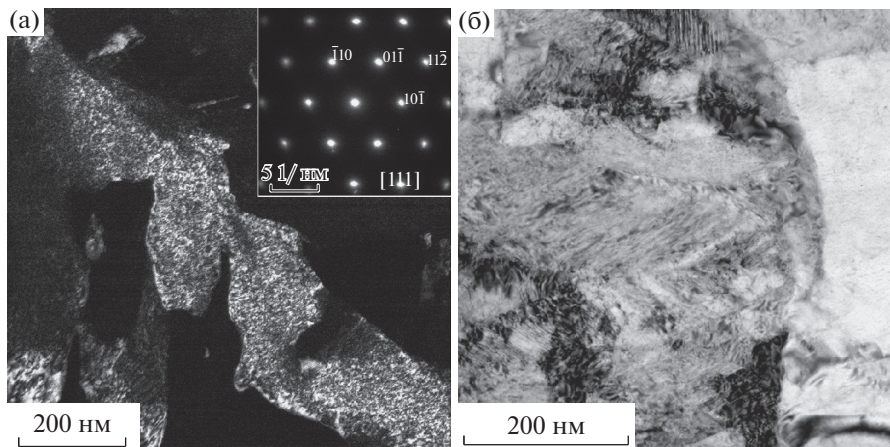


Рис. 4. Структура прирезковой области: а – темнопольное изображение зерен феррита; б – соответствующая микроэлектронограмма; в – паркетная мартенситоподобная структура участка высокой твердости.

состояние стали У8 после деформирующего резания, которое характеризуется наличием мартенситоподобной структуры, возникающей, как известно, в процессе закалки стали. При этом сохраняется исходный нерастворившийся цементит.

Для выяснения возможности реализации закалки сталей и соответствующих структурных превращений при деформирующем резании были проведены экспериментальные и расчетные исследования температур в зоне обработки. С по-

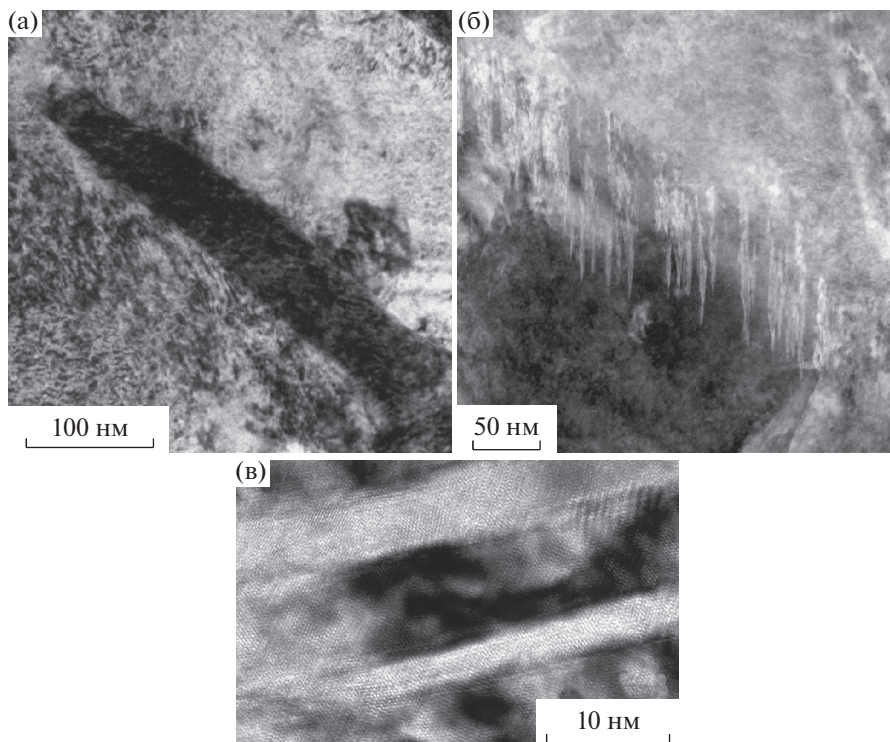


Рис. 5. Пластины цементита разных размеров: а – ПЭМ-изображение крупной пластины; б – ПРЭМ-изображение мелких пластин, растущих на границе зерна; в – РЭМ-изображение высокого разрешения пластин наноцементита.

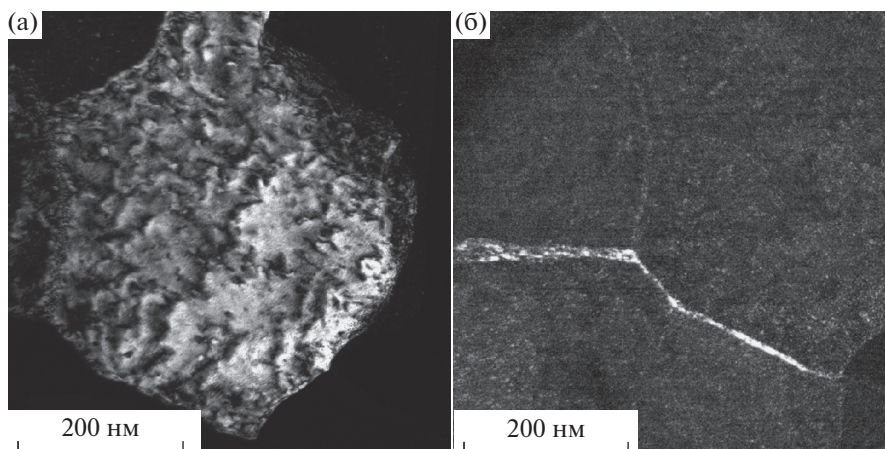


Рис. 6. Субструктура ферритных зерен и пограничные выделения.

мощью термопары была определена средняя температура в зоне резания, которая составила 1100°C . По термодинамическим расчетам средняя температура могла достигнуть даже значения 1500°C . Данные условия достаточны для протекания фазовых превращений при нагреве в процессе деформирующего резания. Оценка скорости нагрева составила 2.7×10^6 град/с, а скорости охлаждения

– 10^4 град/с. Анализ полученных результатов показал, что в процессе деформирующего резания сталь испытывает импульсный нагрев и охлаждение за время порядка 1 с. Таким образом, проведенные исследования позволили определить особенности структурно-фазовых превращений при сверхкритических условиях их реализации, и установлено, что поверхностная закаленная зона

после обработки деформирующим резанием имеет вид наклонных ребер без зазора, может достигать высоты порядка 1 мм.

В [14] была изучена структура стали 35 после обработки деформирующим резанием, которая при толщине ребра ~ 0.07 мм проявляет большую чувствительность к травлению, более дисперсная по сравнению с исходной структурой. Однако структура мартенсита закалки не выявляется. В свободной зоне ребра, т.е. области с меньшей температурой нагрева, наблюдаются даже поля с пониженной твердостью $550 HV_{0.1}$, при твердости $670 HV_{0.1}$ в середине ребра. В стали У8, в отличие от стали 35, поверхностная закаленная зона ребра неоднородна по толщине и обнаруживает целый спектр наноразмерных фаз. Вследствие этого при толщине ребра ~ 0.04 мм травимость прирезцовой и свободной зоны разная, а микротвердость в прирезцовой части ребра, где обнаружены светлые бесструктурные участки, составляет $900 HV_{0.1}$, по сравнению с серединой ребра $670 HV_{0.1}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методами электронной микроскопии установлены следующие особенности структуры упрочненной поверхности стали У8, сформированной в процессе деформирующего резания. Показано, что структура оребренной поверхности крайне неоднородна. При толщине ребра ~ 0.04 мм прирезцовая зона плохо поддается травлению, в ней обнаружены светлые гладкие области, которые имеют сложную структуру, состоящую из разных фаз: феррита неравновесной формы с размерами кристаллов в сотни нанометров, участков с паркетной мартенситоподобной структурой размером в десятки нанометров, нерастворившегося цементита толщиной около 100 нм и вновь образовавшегося наноцементита с шириной пластинок 5–15 нм. Такой спектр структур способствует тому, что микротвердость светлых участков составляет $900 HV_{0.1}$, что в 1.5 раза выше по сравнению со средней микротвердостью прирезцовой зоны.

Свободная зона, наоборот, хорошо травится, светлые области в ней почти отсутствуют, а значение микротвердости $550 HV_{0.1}$ соизмеримо со средней микротвердостью прирезцовой зоны ($600 HV_{0.1}$). Структура этой зоны ребра принципиально отличается и состоит из равноосных ферритных зерен размером ~ 500 нм, имеющих субструктуру с пограничными мелкими выделениями (предположительно, карбидов) размером ~ 10 –20 нм.

БЛАГОДАРНОСТИ

Структурные исследования методами электронной микроскопии частично проведены на оборудовании ЦКП ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН (проект RFMEFI62119X0035) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зубков Н.Н., Васильев С.Г., Попцов В.В.* // Обработка металлов. 2018. Т. 20. № 2. С. 35.
2. *Bulpet R.* The Characterization of White-Etching Layers Formed on Engineering Steels. PhD Thesis. Brunel Technological Institute, 1990.
3. *Металлы и сплавы. Справочник / Ред. Солнцев Ю.П.* СПб: Професионал, Мир и Семья, 2003. 1066 с.
4. *Davim J.P.* Machining Fundamentals and Recent Advances. Springer, 2008.
5. *Davim J.P.* Surface Integrity in Machining. Springer, 2010.
6. *Sipos K., Lopez M., Trucco M.* // Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. 2008. V. 28. № 1. P. 46.
7. *Завьялов А.С., Гольдштейн Л.Я.* // Ж. техн. физики. 1953. Вып. 5. С. 817.
8. *McIntire H.O., Manning E.K.* // Met. Prog. 1958. V. 74. № 5. P. 94.
9. *Савицкий К.В., Коган Ю.И.* // Трение и износ в машинах. 1962. Вып. 15. С. 211.
10. *Палатник Л.С., Любарский И.М., Бойко Б.Т.* // Физика металлов и металловедение. 1956. Т. 2. Вып. 2. С. 285.
11. Patent 5775187 (U.S). Method and Apparatus of Producing a Surface with Alternating Ridges and Depressions / Zoubkov N., Ovtchinnikov A. // N 8/545, 640. Appl. date 27.04.1994. Publ. date 07.07.1998.
12. Патент 2556897 (РФ). Способ поверхностного закалочного упрочнения режущо-деформирующим инструментом / Зубков Н.Н., Васильев С.Г., Попцов В.В. // № 2014101642/02. Заявл. 21.01.2014. Оpubл. 20.07.2015. Бюл. № 20.
13. Патент 2015202 (РФ). Способ упрочнения поверхности детали. / Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Васильев С.Г. и др. // Изобретения. 1994. № 12.
14. *Десярева А.Г., Жигалина О.М., Хмеленин Д.Н. и др.* // Кристаллография. 2019. Т. 64. № 1. С. 120.
15. *Десярева А.Г., Симонов В.Н., Иванова А.Ю.* // Электрометаллургия. 2017. № 12. С. 31.

Surface Structure of Steel U8 after Processing by Deforming Cutting

O. M. Zhigalina^{1, 2, *}, A. G. Degtyareva^{2, **}, D. N. Khmelenin¹, V. N. Simonov²

¹*Shubnikov Institute of Crystallography of Federal Scientific Research Centre "Crystallography and Photonics" of Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333 Russia*

²*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia*

**e-mail: zhigal@ns.crys.ras.ru*

***e-mail: dega_70@mail.ru*

The structure of steel U8 after high-speed deformation cutting has been investigated. The phase composition and structural features of the hardened surface layer consisting of areas (so-called ribs) tightly adjacent to each other are established. Optical and electron microscopy methods have revealed the following structural features in the near-edge zone of the rib: nonequilibrium ferrite and coarse-grained martensite with crystal sizes of about 100 nm, parquet martensite-like structures with plate widths of tens of nanometers and cementite crystals of various sizes from 10 to 100 nm. Such an inhomogeneous structural state arises in the area of the rib adjacent to the cutter during the deformation cutting. The structure of the opposite zone of the rib is different and consists of equiaxed ferrite grains of ~500 nm in size with fine precipitates (presumably carbides) in the grain boundaries of 10–20 nm in size.

Keywords: deformation cutting, electron microscopy, phase composition, ferrite, martensite-like structure, nanocementite, microhardness.