DOI: 10.18411/vntr2025-177-2

УДК 620.186.5

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТЕХНИЧЕСКОГО ЖЕЛЕЗА ДЕФОРМИРУЮЩИМ РЕЗАНИЕМ

© Алла Григорьевна Дегтярева [1], Ольга Михайловна Жигалина[2,1]
[1]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
dega_70@mail.ru
[2]НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия
zhigal@crys.ras.ru

Аннотация. *В работе рассмотрено влияние деформирующего резания (ДР) на структуру и упрочнение поверхностного слоя технического железа. Показано, что при обработке ДР зеренная структура феррита изменяется. За счет прохождения процессов динамической рекристаллизации средний размер зерна снижается в 20 раз по сравнению с необработанной сердцевиной. При этом микротвердость поверхностного слоя увеличивается в 1,7 раза и практически не изменяется по всей толщине слоя.*
Ключевые слова: *феррит, техническое железо, деформирующее резание, поверхностное упрочнение, зеренная структура.*

Работа выполнена по Государственному заданию НИЦ КИ в части анализа данных.

CHANGES IN THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF TECHNICAL IRON AFTER PROCESSING BY DEFORMING CUTTING

© Alla Degtyareva[1], Olga Zhigalina[2,1]
[1]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
dega_70@mail.ru
[2]SRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia
zhigal@crys.ras.ru

Abstract. *The paper examines the effect of deforming cutting (DC) on the strengthening and structure of the surface layer of technical iron. It is shown that during DC processing the grain structure of ferrite changes. Due to the dynamic recrystallization processes, the average grain size decreases by 20 times compared to the untreated core. At the same time, the microhardness of the surface layer increases by 1.7 times and remains virtually unchanged throughout the entire thickness of the layer.*
Keywords: *ferrite, technical iron, deforming cutting, surface strengthening, grain structure.*

Acknowledgements. *The work was carried out according to the State assignment of the Kurchatov Institute Research Center in terms of data analysis.*

Введение. В настоящее время получение новых конструкционных материалов, обеспечивающих заданный комплекс эксплуатационных свойств, реализуется в процессе применения разнообразных способов обработки: закалка из жидкого состояния, обработка токами высокой частоты, лазерное термоупрочнение, электромеханическая обработка, специальное точение, множество видов поверхностной пластической деформации (алмазное выглаживание, накатка регулярных микрорельефов, дробеструйная обработка) и многие другие [1]. Под влиянием экстремально высоких температур, скоростей нагрева и охлаждения, а также значительных степеней деформации, формируются структурно-фазовые состояния, принципиально отличающиеся от таковых после традиционной термической обработки. При этом пластическая деформация реализуется за счет локального силового воздействия на обрабатываемую поверхность.

Поверхностную пластическую деформацию используют для повышения твердости, прочности и износостойкости поверхностного слоя. Упрочнение происходит за счет увеличения плотности дислокаций, формирования мелкозернистой структуры, возникновения границ блоков и двойников [2]. Однако, методы поверхностного упрочнения деформацией имеют существенные недостатки: малую глубину упрочнения, неравномерное распределение твердости по толщине упрочненного слоя, необходимость использования дорогостоящих приспособлений.

Особое место в разнообразных видах поверхностной обработки конструкционных материалов занимает высокоскоростная обработка деформирующим резанием (ДР) [3], реализуемая на стандартном металлорежущем станке с использованием простого инструмента.

Деформационное упрочнение поверхности методом деформирующего резания (ДР) — это поверхностная обработка, в основе которой лежит процесс частичного срезания припуска и целенаправленного пластического деформирования подрезанного поверхностного слоя [3]. Образующаяся при ДР стружка не отделяется полностью от заготовки, сохраняя с ней связь по своей узкой стороне (**Рис.1**).

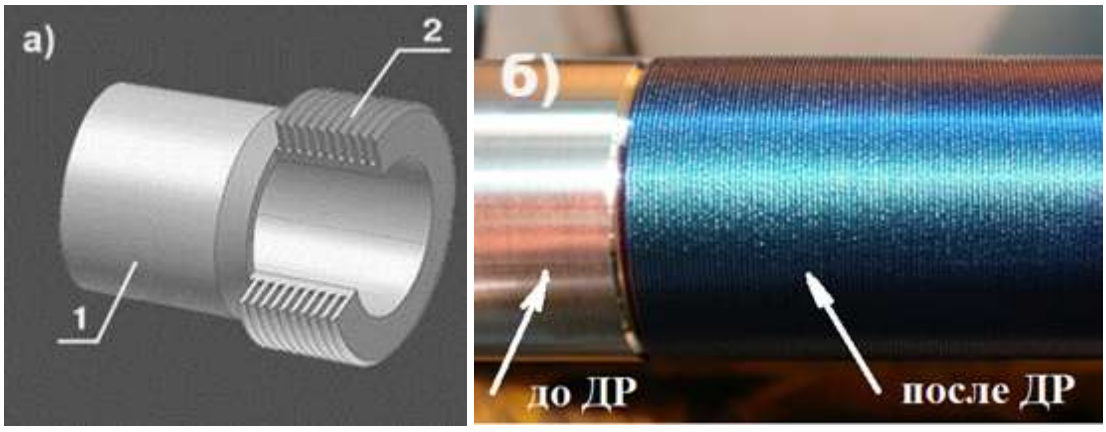


Рис. 1. Схема получения (а) и макрорельеф поверхности обработанной ДР (б)
1 - основной материал, 2 – оребрение (стружка, не отделившаяся полностью от заготовки).

Совокупность подрезанных поверхностных слоев, которые сохранили сплошность своего соединения с заготовкой, образует на обработанной поверхности детали развитый макрорельеф. Форма получаемого макрорельефа определяется геометрическими

параметрами инструмента и режимами обработки [4]. По сравнению с другими методами поверхностного пластического деформирования ДР имеет следующие преимущества: может выполняться той же технологической операцией, что и получение обрабатываемой поверхности, упрочненный макрорельеф формируется за один проход инструмента, толщину упрочненного слоя легко прогнозировать, исходя из геометрических параметров инструментов и режимов резания.

В данной работе исследовали особенности структурного состояния поверхностного слоя металла в виде наклонных ребер, плотно прилегающих друг к другу, не образуя зазор, после обработки методом деформирующего резания.

Материалы и методы исследования. Для анализа поведения феррита при ДР использовали техническое железо с содержанием углерода менее 0,05 %. В качестве заготовки использовали вал диаметром 70мм в состоянии поставки (нормализация).
Для металлографических исследований сначала подготовили поперечные срезы (с применением электроэрозионного вырезного станка) и затем шлифы поперечных срезов оребренных структур поверхности (после ДР).
Заливку микрошлифов осуществляли в прессе для горячей запрессовки Struers CitoPress-20. Образцы запрессовывали в цилиндр диаметром 25 мм. Металлографический анализ проводили на полированной поверхности шлифов, предварительно протравленной 4% раствором HNO_3 в C_2H_5OH в течение 4-6 секунд. Микроструктуру изучали с помощью светового металлографического микроскопа Olympus GX51. Измерения объектов проводили в программе SIAMS 700, предназначенной для проведения полуавтоматического измерения геометрических характеристик объектов на изображении.
Заготовка **(**вал) была обработана ДР по режиму: скорость ДР V= 3,6 м/с; значение подачи S_0= 0,05 мм/об; глубина резания t= 1 мм.

Результаты и их обсуждение. Микроструктура образца представлена на **рис.2.**

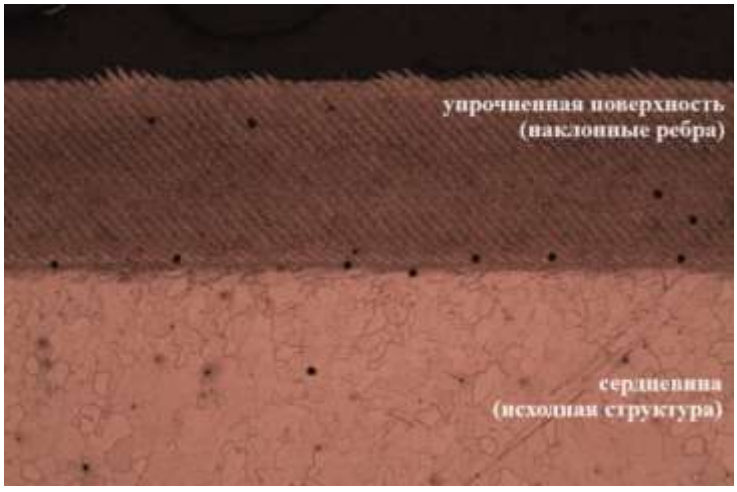
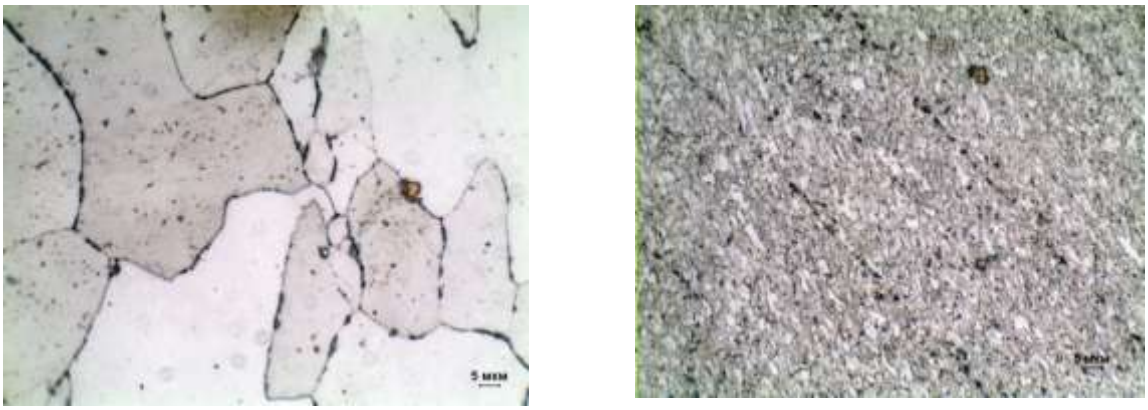


Рис. 2. Микроструктура образца технического железа после обработки ДР (х50)
(режим ДР: V= 3,6 м/с; S_0= 0,05 мм/об; t= 1 мм)

Металлографический анализ образцов технического железа показал наличие двух зон на шлифах исследуемого материала, четко видимых на образце: упрочненная поверхность (наклонные ребра) и сердцевина (исходная структура) (**рис.2**.). Микротвердость в указанных

зонах составила: сердцевина ~150 $HV_{0,1}$, упрочненная поверхность ~250-260 $HV_{0,1}$. Микротвердость поверхностного слоя увеличилась в 1,7 раза по сравнению с необработанной сердцевиной. Расчет размеров ферритных зерен показал, что ДР приводит к измельчению зерна феррита в техническом железе более, чем в 20 раз. Так, до обработки размер зерен составлял ~20,3 мкм, а после - (в упрочненной поверхности) ~1,1 мкм (**рис.3**.). Вероятно, при ДР наклеп снимается за счет динамической рекристаллизации, которая приводит к получению такой дисперсной равноосной структуры феррита.
Особенностью поверхностного упрочненного ДР является то, что микротвердость по всей толщине слоя практически не изменяется.



а) б)

Рис 3. Зерно феррита технического железа
а) до обработки ДР (среднее значение 20,3 мкм); б) после обработки ДР (среднее значение 1,1 мкм).

Микроструктурный анализ при большем увеличении показал, что у основания ребер, со стороны, которая не контактирует с резцом при обработке ДР, могут наблюдаться светлые участки (показаны стрелками на **рис.4.**) с повышенной микротвердостью до 310 $HV_{0,05}$ Микроструктура этих участков волокнистая, без признаков рекристаллизации, возможно, за счет меньшего трения и пластической деформации при ДР они нагреваются ниже температуры рекристаллизации, при этом наклеп сохраняется.

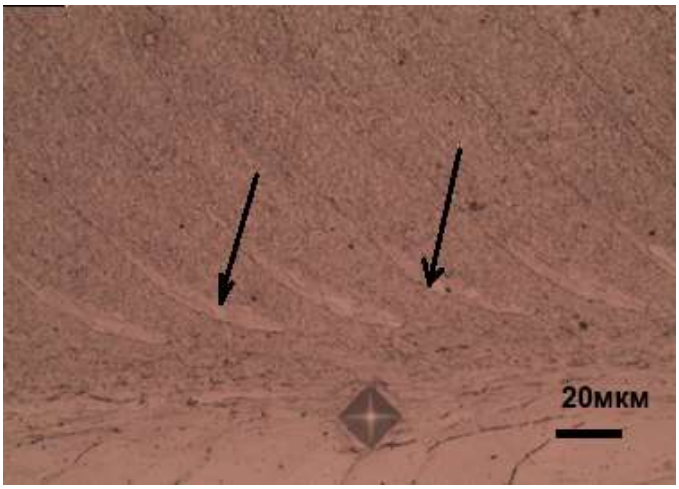


Рис. 4. Структура образца технического железа у основания оребренной поверхности. Светлые деформированные участки обозначены стрелками.

Между упрочненной поверхностью (под светлыми деформированными участками) и сердцевиной обнаружена третья (переходная зона) с микротвердостью 280-290 $HV_{0,1}$, что почти на 50% выше, по сравнению с сердцевиной.

Ранее проведенные исследования [5] показали, что подача при обработке ДР имеет важное значение для получения однородной структуры в ребрах (чем меньше значение подачи, тем однороднее структура).

Поэтому, для сравнения, заготовку дополнительно обработали ДР с большей подачей (S_0= 0,1 мм/об, скорость и глубину ДР не изменяли). Анализ микроструктуры технического железа после ДР с разной подачей S_0= 0,1мм/об (**рис 5, а**) и S_0= 0,05мм/об (**рис 5, б**) показал, что в образце, обработанном с большей подачей (S_0=0,1мм/об), наблюдается волокнистая структура феррита с включениями мелких равноосных зерен, что соответствует началу первичной рекристаллизации. Значения микротвердости, измеренные в середине ребра, составляют 280 $HV_{0,05}$. Снижение значения подачи до S_0=0,05мм/об приводит к получению равноосной, рекристаллизованной структуры без признаков деформации. К тому же, в структуре наблюдаются отдельные достаточно крупные зерна. Этот факт указывает на прохождение процессов собирательной рекристаллизации. Микротвердость уменьшается до 240 $HV_{0,05}$.

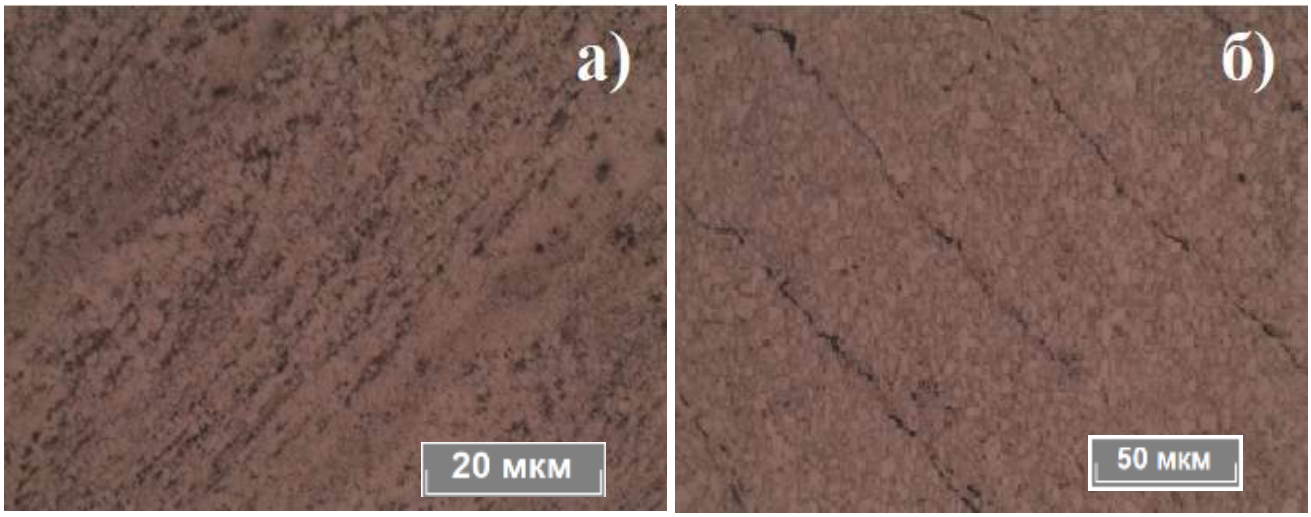


Рис. 5. Упрочненная поверхность технического железа
после обработки ДР, (х1000)
Режим ДР: V= 3,6 м/с; t= 1 мм, а) S_0= 0,1 мм/об; б) S_0= 0,05 мм/об

Заключение. Проведенные металлографические исследования показали, что в процессе высокоскоростной обработки методом деформирующего резания образуется упрочненный поверхностный слой толщиной ~ 1мм. Поверхностный слой представляет собой периодически повторяющиеся области (наклонные ребра) с неоднородной структурой по ширине. В пределах каждого ребра обнаружены две зоны, принципиально различающиеся по структуре: прирезцовая (зона контакта с резцом) и свободная (без контакта с резцом). В результате обработки технического железа происходит измельчение феррита в 20 раз, создание равноосной рекристаллизованной структуры разной степени дисперсности, деформированной волокнистой структуры или их сочетание.

Список литературы

1. Ежелев А. В. Бобровский И. Н., Лукьянов А. А. Анализ способов обработки поверхностно-пластическим деформированием // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6-3. – С. 642-646.
2. Пашинская Е.Г. Физико-механические основы измельчения структуры при комбинированной пластической деформации. - Донецк: Вебер, 2009. - 352 с.
3. Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Васильев С.Г., Симонов В.Н., Хасянов М.А. Патент на изобретение №2015202. РФ. Способ упрочнения поверхности детали // Изобретения. - 1994. - №12.
4. Шуляк Я.И. Разработка и исследование способа деформационного упрочнения поверхностей деталей методом деформирующего резания: дис. … канд. техн. наук. Москва. 2017.
5. Дегтярева А.Г., Симонов В.Н., Иванова А.Ю. Влияние толщины ребра стали 35 на упрочнение при деформирующем резании // Электрометаллургия. - 2017. - №12. - С. 31-36.

Дата поступления: 10 апреля 2025 г.