

УДК 621.789

Формирование закаленных структур в стали 35 методом деформирующего резания

Дегтярева А. Г.^{1,*}, Попцов В. В.¹, Симонов
В. Н.¹, Васильев С. Г.¹, Варламова С. Б.²

* dega_70@mail.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

²ОАО «Композит», г.Королев, Россия

В статье рассмотрены основные принципы, особенности реализации и технологические возможности механо-термического метода поверхностного упрочнения стальных изделий с созданием в поверхностных слоях закаленных структур. В основе метода лежит процесс деформирующего резания (ДР), в результате которого на заготовке формируется регулярная оребренная структура имеющая зоны высокой твердости. Описаны особенности, условия получения и основные факторы, способствующие формированию упрочненных структур различных типов. Проведены металлографические исследования упрочненных структур, выполнены измерения микротвердости. Определено влияние различных режимов отпуска на микроструктуру и твердость упрочненного слоя. Произведены сравнительные результаты измерений.

Ключевые слова: деформирующее резание, поверхностное упрочнение, механо-термическая обработка, сквозная закалка, частичная закалка, микротвердость

Введение

Актуальной и приоритетной задачей в машиностроении является решение проблемы повышения надёжности и долговечности узлов трения. К деталям машин, работающим в парах трения в условиях интенсивного изнашивания, циклических нагрузок и вибраций, предъявляются повышенные требования по износостойчивости наружной трущейся поверхности с одновременно высокими требованиями прочности всего изделия [1]. Для обеспечения данных требований к деталям в машиностроении используются различные методы поверхностного упрочнения. К существующим технологиям упрочнения поверхностного слоя можно отнести метод деформирующего резания (ДР) [2...5], в область использования которого входит группа направлений по повышению износостойкости поверхностей деталей машин [6...8].

Целью данной статьи является обоснование возможности использования метода ДР для создания на стали полностью или частично закаленного поверхностного слоя большой толщины (0,4...1,5мм) без привлечения дополнительных источников нагрева и исследование свойств получаемых структур.

Отличительной особенностью способа является использование стандартного металлорежущего оборудования и простого инструмента. Формирование закалённых структур нового типа происходит при нестандартных условиях обработки.

Особенности метода механо-термического упрочнения деформирующим резанием

Метод деформирующего резания, предназначен для создания развитых поверхностных структур в виде чередующихся выступов и впадин и относится к методу механической обработки. На рис.1 представлена схема формирования регулярной макроструктуры на наружной цилиндрической поверхности стальной детали. К физическим явлениям рассматриваемого метода механической обработки относятся процессы теплового и силового воздействия инструмента на подрезаемые слои обрабатываемого материала. Первоначально идея использования метода ДР для создания упрочненного макрорельефа на наружной поверхности стальной детали изложена в патенте РФ [4]. Основная идея использования тепловыделения процесса ДР для формирования закаленных структур на рабочей поверхности детали предложена профессором Зубковым Н.Н.

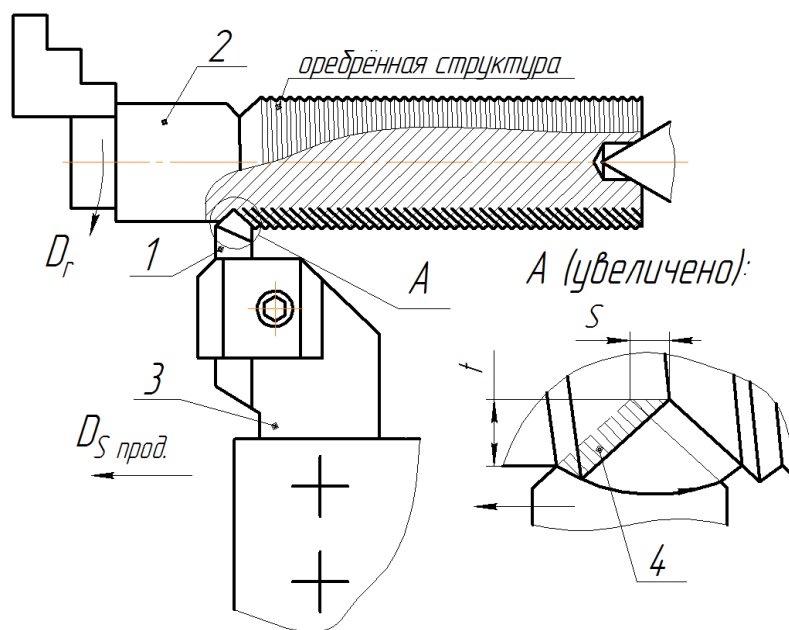


Рисунок 1. Схема обработки методом деформирующего резания

1 – инструмент, 2 – заготовка, 3 – державка, 4 – подрезаемый слой.

В идее способа упрочнения деформирующим резанием лежит предположение, что определённое сочетание режимов обработки, геометрических параметров режущего инструмента, теплофизических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, в совокупности должно способствовать протеканию структурных превращений в формируемых слоях регулярного макрорельефа. Предположение находит подтверждение в работах [7,8]. Таким образом, целенаправленное использование тепловыделения в зоне ре-

зания и механического воздействия режущего инструмента на формируемый макрорельеф позволяет нагревать подрезаемые слои металла до закалочных температур с одновременным их пластическим деформированием.

Предлагаемый способ упрочнения можно отнести к методу механо-термической обработки, осуществляемому на стандартном металлорежущем оборудовании (универсальные и специализированные станки фрезерной, токарной и строгальной групп) инструментом типа проходного резца со специальной геометрией заточки без использования термического оборудования. При сравнении с альтернативными технологическими способами поверхностной упрочняющей обработки можно отметить особенности предлагаемого метода упрочнения:

- время контакта материала подрезанного слоя и резца составляет $10^{-3} \dots 10^{-4}$ секунды и соответствует времени теплового и силового взаимодействия инструмента и подрезаемого слоя металла;
- формирование макроструктуры протекает при высокой степени и скорости деформации, а также высоких температурах в зоне резания;
- источник тепловыделения является локализованным, ограничен активной частью рабочего клина инструмента, имеет высокую плотность мощности подводимой энергии к подрезаемому слою с ориентировочными значениями, превышающими 10^4 Вт/см²;
- средние скорости нагрева формируемого макрорельефа в процессе ДР превышают 10^6 °C/с, что значительно выше средних скоростей нагрева при традиционных методах поверхностной закалки (закалка ТВЧ, газопламенная закалка);
- возможны сверхвысокие скорости охлаждения за счёт кондуктивного теплоотвода нагретой макроструктуры в холодные слои заготовки.

К близким методам поверхностного упрочнения можно отнести технологии электромеханической обработки [9] и упрочняющего течения [11]. Способ электромеханической обработки заключается в прохождении через место контакта инструмента с деталью тока большой силы и при малом напряжении. Это приводит к нагреву поверхности со скоростью нагрева порядка $10^5 \dots 10^6$ °C/с, при этом инструмент в виде пластины или ролика поджимается к заготовке с определённым усилием (450...1500Н). Помимо нагрева от прохождения тока присутствует нагрев от трения и деформации материала от воздействия инструмента на деталь. При упрочняющем течении происходит ухудшение условия стружкообразования и за счет этого удается поднять температуру поверхностных слоев на обрабатываемой поверхности заготовки с получением закалочных структур. Это достигается тем, что при течении используется инструмент, имеющей фаску на задней поверхности с нулевым задним углом.

Предлагаемый способ поверхностного упрочнения ДР ориентирован, в первую очередь, на закаливаемые конструкционные и специальные стали. В качестве упрочняемых, предлагаются поверхности относительно простой формы: плоскости, наружные и внутренние цилиндрические поверхности. Степень нагрева и характер силового воздействия

на подрезаемые слои заготовки может регулироваться за счет параметров режима резания, геометрических параметров рабочей части инструмента при учёте физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов. Технологические параметры режимов резания в совокупности с геометрическими параметрами режущей части клина инструмента являются определяющими для получения различных типов, размеров и свойств упрочняемых оребрѐнных структур. Полнота прохождения структурных превращений зависит от величины тепловыделения в зоне резания, линейных размеров единичного ребра, от угла в плане ϕ , подачи S , глубины резания t , степени и скорости пластической деформации материала формируемого ребра, физико-механических свойств обрабатываемого материала. Охлаждение оребрѐнной структуры происходит благодаря кондуктивному теплоотводу в нижележащие холодные слои заготовки, при необходимости дополнительного охлаждения образующегося макрорельефа, существует возможность производить обработку с использованием технологических охлаждающих сред.

К основным требованиям, предъявляемым к инструментальному материалу, относятся высокая теплостойкость, химическая инертность материала при высоких температурах, высокая износостойкость; к обрабатываемому материалу - наличие свойств закаливаемости. При формировании опытных упрочненных образцов в качестве инструментального материала использовался твёрдый сплав марки T15K6, T14K8, режущая керамика марки ЦМ-332 и композиции на основе кубического нитрида бора. Для получения различных размеров и типов упрочненных структур целесообразно увеличивать степень нагрева и деформацию подрезаемых слоѐв за счет выбора геометрических параметров режущего клина, режимов резания, теплофизических и механических свойств обрабатываемого материала.

К основным путям интенсификации тепловыделения в зоне обработки и силовых воздействий при обработке, можно отнести:

- увеличение скорости резания;
- уменьшение переднего угла, увеличение угла при вершине в плане, увеличение радиусов округления рабочих кромок, уменьшение задних углов.

Для подтверждения возможности протекания структурно-фазовых превращений в процессе ДР проводились лабораторные исследования на различных марках конструкционных сталей [8]. В данной работе предлагаются результаты по получению и изучению упрочнѐнных структур на стали 35.

Сталь 35 является конструкционной закаливаемой сталью, повсеместно применяемой в машиностроении для широкой номенклатуры деталей, в том числе и валов. Данная сталь выбрана в качестве модельного материала из-за удовлетворительной обрабатываемости методом деформирующего резания и прогнозируемости протекания структурных превращений вследствие отсутствия легирующих элементов.

В качестве заготовок были использованы стальные валы, материал находился в состоянии поставки (термообработка - нормализация). Рассмотрены оребрѐнные структуры

двух типов (рисунок 2): со сквозной (рисунок 2-а, в) и частичной закалкой формируемых рёбер (рисунок 2-б, г), которые и стали предметом дальнейших исследований.

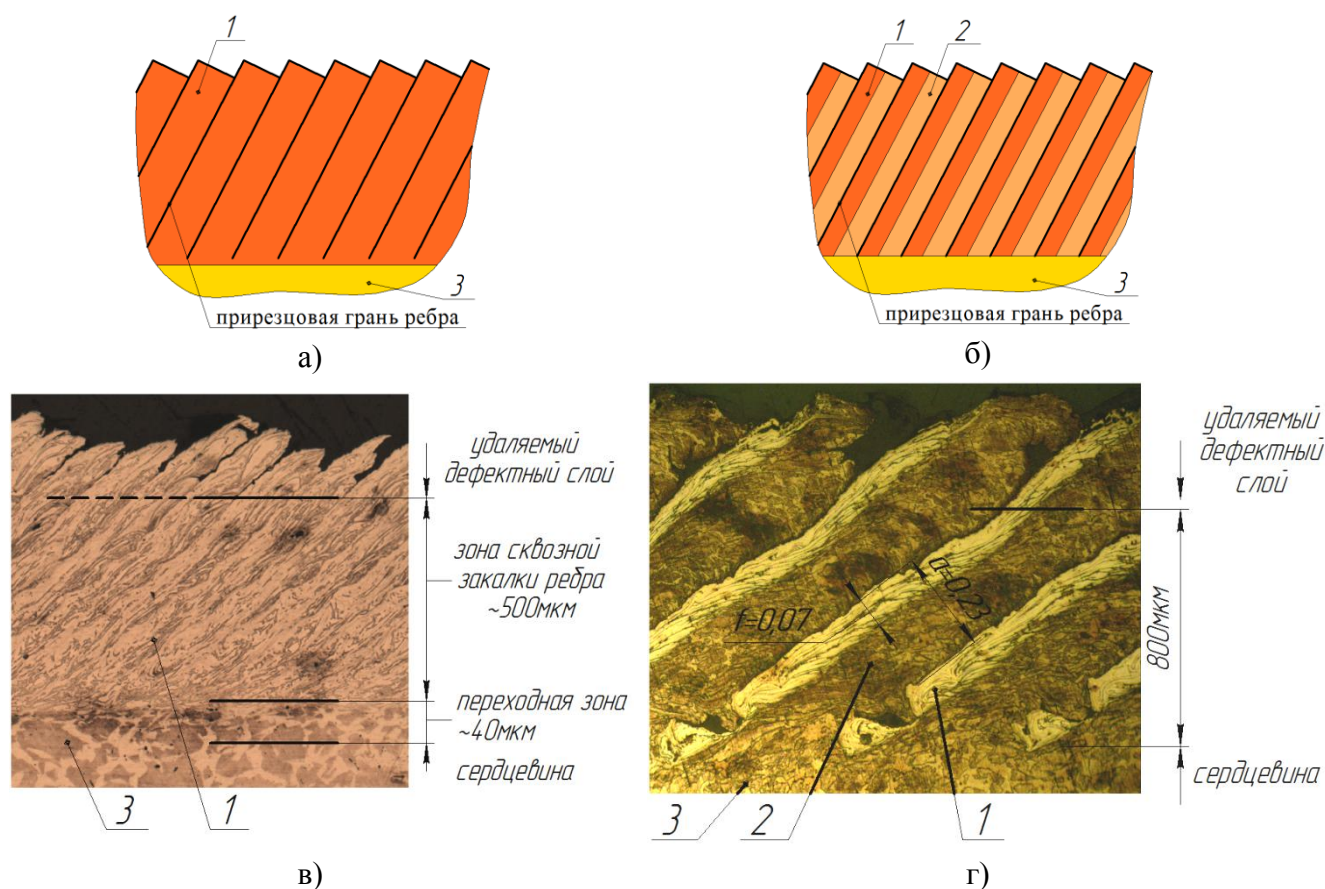


Рисунок 2. Варианты ребрѐнных структур: а) сквозная закалка ребра; б) частичная закалка ребра; 1 – зона ребра с фазово-структурными превращениями; 2 – зона ребра не претерпевшая структурно-фазовых превращений (деформированные феррито-перлитные зѐрна; 3 – зона основного материала. в) и г) микрошлифы поперечных срезов ребрѐнных структур со сквозной и частичной закалкой рѐбер соответственно (x100).

Для получения структур со сквозной закалкой ребра (рисунок 2-а, в) использовался режущий инструмент из оксидной минералокерамики марки ЦМ332 с главным углом в плане равным $\phi=42^\circ$ и передним углом равным $\gamma=-18^\circ$. Режимные параметры назначались из соображений достижения значительной удельной тепловой мощности в ребре (мощности резания, приходящейся на площадь осевого сечения ребра - $P/(S \cdot t)$, где S [мм/об] – подача на оборот, t [мм] – глубина резания), а также из необходимости обеспечения нагрева выше температур критических точек и высоких степеней и скоростей деформации по всему объѐму формируемого ребра. Заданные условия выполняются при назначении высоких значений скоростей резания $V \geq 3$ м/с и малых значений подач $S \leq 0,2$ мм/об. Для образца со сквозной закалкой подача составила $S=0,1$ мм/об.

Для реализации частичной закалки использовался инструмент из тѐвдого сплава марки Т15К6 с углами равными $\phi=42^\circ$ и $\gamma=-18^\circ$. При подачах S более 0,2 мм/об область структурных превращений, где происходит нагрев до закалочных температур, ограничи-

вается прослойкой с контактной прирезцовой стороны ребра. В остальной части ребра, где отсутствуют структурные превращения, нагрева до закалочных температур не происходит из-за недостаточного количества выделяемой теплоты, значительной толщины ребра и, как следствие, быстрого отвода в сердцевину. За счёт варьирования подачи можно получить необходимое соотношение между толщинами закалённой прослойки и общей толщины ребра. Для образца с частичной закалкой подача составила $S=0,4$ мм/об.

Геометрические параметры инструмента для реализации частичной и сквозной закалки подбираются экспериментальным способом, с учётом необходимости интенсификации тепловыделения от основных источников [2] и значительных деформаций поверхностного слоя, и отличаются от данных представленных ранее [4]. Использование инструментальных материалов со сравнительно невысокими прочностными характеристиками (минералокерамика, кубический нитрид бора) предполагает подбор геометрических параметров режущего клина для создания условий всестороннего сжатия. Поставленные требования реализуются при использовании инструмента со значительными величинами переднего угла γ на режущей кромке и углом при вершине в плане ϵ .

Методика и результаты металлографических исследований

Для проведения металлографических исследований и измерения микротвёрдости были подготовлены шлифы поперечных срезов оребрённых структур со сквозной и частичной закалкой рёбер (рисунок 2-в, г). Поперечные срезы участков оребрённого вала выполнялись на электроэрозионном вырезном станке.

На образце со сквозной закалкой ребра глубина упрочнённой оребрённой структуры после удаления дефектного слоя составила 0,5мм (рисунок 2-в), в случае с частичной закалкой ребра - 0,8мм (рисунок 2-г). На образце с частичной закалкой ребра толщина наклонной закалённой прослойки с прирезцовой стороны составляет в среднем величину равную $f=70$ мкм при общей толщине ребра равной $a=230$ мкм.

Металлографический анализ проводился на полированной поверхности шлифов, предварительно протравленной 4% раствором HNO_3 в $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$. Измерения микротвёрдости осуществляли на твердомере модели DuraScan 70 индентером в виде алмазной пирамидки правильной четырёхгранной формы с нагрузкой 100г. Микроструктура изучалась с помощью оптического металлографического микроскопа Olympus GX51.

Проведенные микроструктурные исследования образцов со сквозной закалкой ребра показали наличие трех зон на шлифах исследуемого материала (рисунок 2-в), четко видимых на образце: зона сквозной закалки ребра, переходная зона (между оребрённой структурой и основным материалом заготовки) и сердцевина. Микротвёрдость в указанных зонах составила: сердцевина (основной материал) 209 HV0,1, зона сквозной закалки - 653 HV0,1, переходная зона - 354 HV0,1. Схема измерения микротвёрдости представлена на рисунке 3: а) сердцевина (основной материал заготовки) - 10 произвольных отпечатков, б) зона сквозной закалки – дорожки в середине трёх произвольно выбранных ребер, по 6 отпечатков в каждой, с шагом 100мкм, начиная с первой точки, находящейся на расстоя-

нии около 50мкм от переходной зоны; в) переходная зона – измерения проводили ступенчато, от зоны сквозной закалки к сердцевине, по пяти измерений на ступеньке, всего четыре ступени с шагом 10мкм.

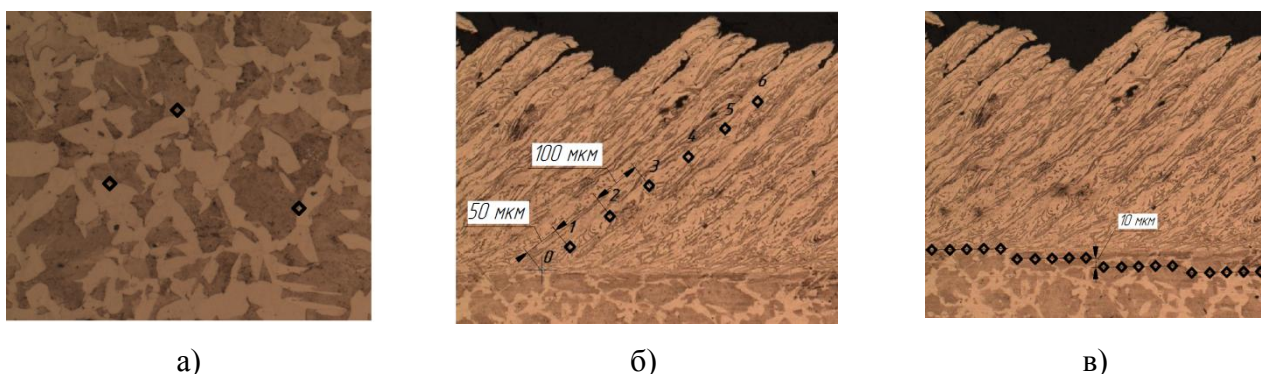


Рисунок 3. Схема измерения микротвердости образцов из стали 35 со сквозной закалкой:

а) основной материал заготовки; б) середина ребра; в) переходная зона.

Очевидно, что при сквозной закалке в ребре имеются зоны полной и неполной закалки, что связано с неравномерным, высокоскоростным нагревом (скорость нагрева порядка $10^6\text{C}/\text{сек}$) подрезаемых слоев по сечению и быстрым охлаждением за счет отвода тепла в тело заготовки и окружающую среду. Во время этого процесса перлит претерпевает превращение в неоднородный, мелкодисперсный аустенит. Избыточный феррит, испытывая значительную пластическую деформацию, вытягивается в волокна, одновременно подвергаясь динамической полигонизации. В структуре сквозной закалки ребра (рисунок 4) обнаруживаются новые равноосные, вероятно, полигонизованные зерна феррита.

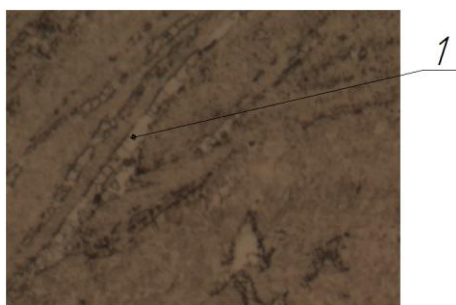


Рис. 4. Микроструктура ребра при сквозной закалке (x1000):

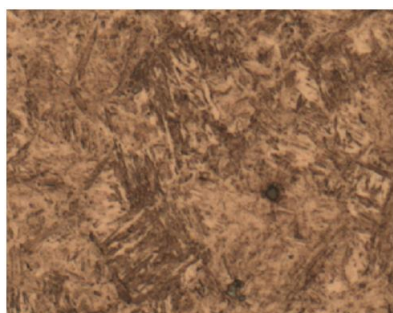
1- полигонизованные зёрна феррита.

В результате быстрого охлаждения со скоростью, больше критической, в поверхностной оребрѐнной структуре формируется предположительно неоднородный мелкодисперсный мартенсит с включениями полигонизованного феррита.

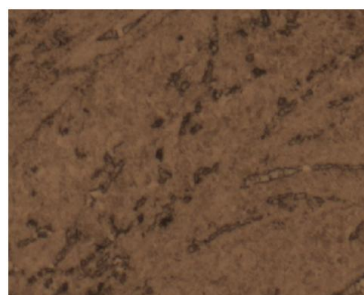
Переходная зона представляет собой деформированный участок основного материала заготовки со средней твердостью равной 354 HV_{0,1}.

Для образцов со сквозной закалкой ребра был проведён отпуск с температурами от 200.. до 700°C (с шагом 100 °C) с целью выяснить поведение упрочненного слоя при различных температурах отпуска.

На рисунке 5 приведены микрофотографии структур после объемной закалки и ДР со сквозной закалкой ребра (рисунок 5а,б) и последующего высокого отпуска при 600°C (рисунок 5 в, г). Сравнительный металлографический анализ показывает, что структуры, образовавшиеся в процессе ДР отличаются большей степенью дисперсности, что подтверждается более мелкими продуктами распада мартенсита.



а) x500



б) x500



в) x500



г) x500

Рисунок 5. Микрофотографии структур а) после объёмной закалки б) ДР со сквозной закалкой ребра в) после объёмной закалки и отпуска $T=600^{\circ}\text{C}$ г) ДР со сквозной закалкой ребра и последующего отпуска $T=600^{\circ}\text{C}$.

Сравнительные значения микротвердости представлены на рисунке 6.

При всех температурах отпуска микротвердость после ДР со сквозной закалкой ребра выше, чем при аналогичных температурах после объемной закалки. Эти данные свидетельствуют о высокой степени дисперсности мартенсита, полученного ДР и продуктов его распада при отпуске.

При температуре низкого отпуска 200°C (рисунок 6) в зоне сквозной закалки ребра, после ДР наблюдается увеличение твердости, по сравнению с исходным состоянием с 653HV_{0,1} до 720HV_{0,1}. Данный факт можно объяснить выделением ϵ -карбидов, когерентных с матрицей, однако, явных изменений в структуре не выявлено. Дальнейшее

увеличение температуры отпуска плавно снижает показатели твердости закаленной зоны, что связано с распадом мартенсита и образованием перлитоподобных структур разной степени дисперсности.

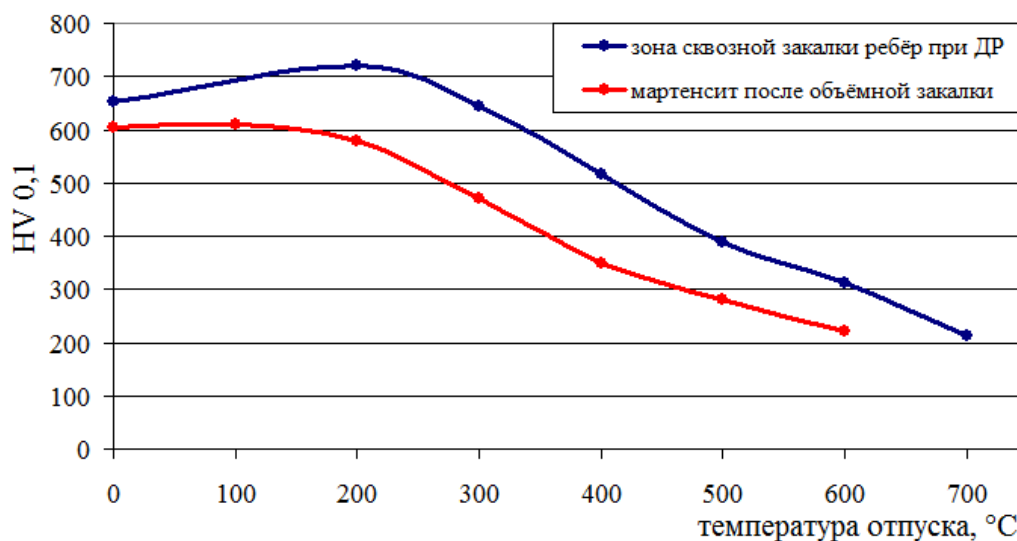
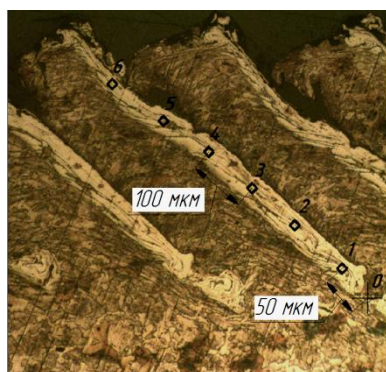


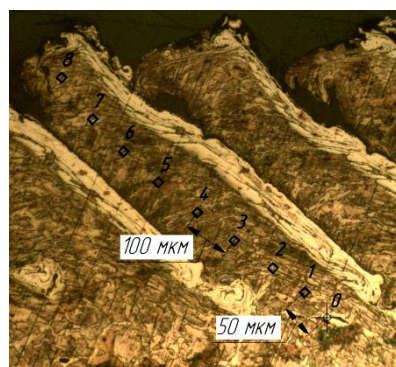
Рисунок 6. Влияние температуры отпуска на твёрдость зоны сквозной закалки ребра, полученной в процессе ДР и мартенсита, после стандартной объемной закалки.

Аналогичные исследования проводились на образцах с частичной закалкой ребра (рисунок 1-б, г).

Микроструктурные исследования показали в образцах наличие трёх зон: сердцевинной и двух зон в ребре – закаленную зону с прирезцово́й стороны, твердость составляет в среднем 485HV_{0,1} и зону деформированных феррито-перлитных (Ф-П) зерен с твердостью 344 HV_{0,1}.



а)



б)

Рисунок 7. Схема измерения твердости образцов с частичной закалкой ребра:

а) в закаленной зоне ребра; б) в деформированной зоне ребра.

Измерения твердости ребер проводили по схеме, представленной на рисунке 7. В закаленной зоне выстраивали три дорожки по шесть отпечатков в каждой, с шагом 100мкм; в зоне деформированных Ф-П зерен измерения проводили, аналогично, по восемь отпечатков в ребре.

Вероятно, что температура нагрева поверхностного слоя заготовки во время процесса ДР была ниже, чем в случае получения ребер со сквозной закалкой, и в силу значительной толщины ребра происходил интенсивный теплоотвод в сердцевину заготовки, поэтому закалку претерпела только прирезцовая часть ребра (рисунок 8), характер ее структуры схож со структурой ребер со сквозной закалкой. Видны вытянутые волокна деформированного феррита с «островками» новых зерен.



Рисунок 8. Микрофотография ребра с частичной закалкой (x1000).

закаленная зона , 2-зона деформированных Ф-П зерен

Тем не менее, твердость закаленной зоны в ребре с частичной закалкой составляет 485HV_{0,1} (при сквозной закалке ребра 653HV_{0,1}). Пониженное значение твердости может быть связано с большим количеством избыточного феррита. Зона деформированных Ф-П зерен ребра имеет твердость 344HV_{0,1}.

Последующий отпуск при температурах 200, 300, 400, 500, 600 и 700 °С с выдержкой в печи 45 минут и охлаждением на воздухе приводит к изменениям микротвердости (рисунок 9).

Прирезцовая часть ребра, имеющая закаленную структуру с твердостью 485HV_{0,1} при низком отпуске 200°С показывает повышение твердости до 641HV_{0,1}. Деформированная феррито-перлитная структура вплоть до температуры статической рекристаллизации ~500°С (0,3..0,4T_{пл}) не изменяет своей микротвердости (335..363HV_{0,1}), далее идет снижение (600°С - 246HV_{0,1}, 700°С - 171HV_{0,1}).

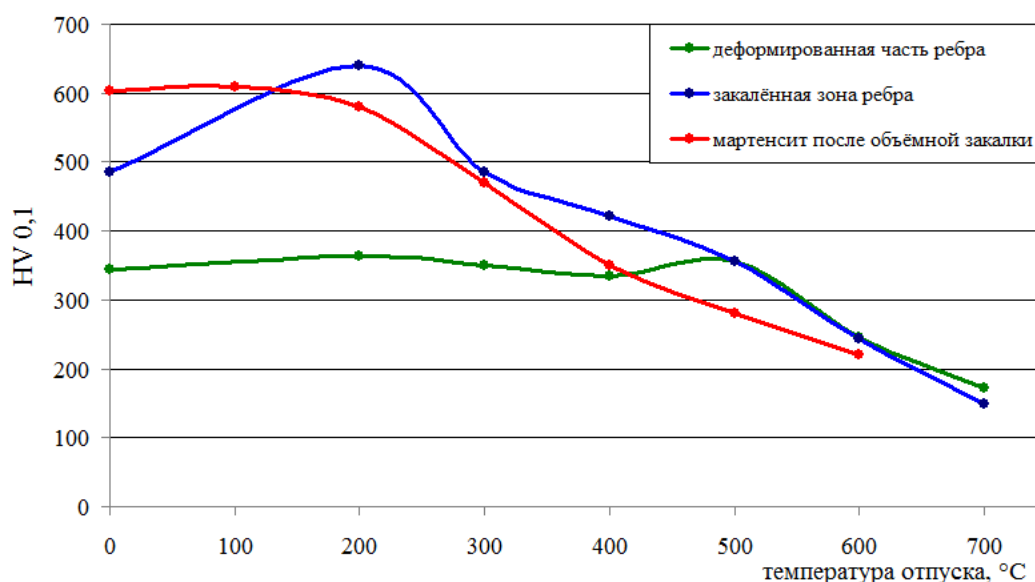


Рисунок 9. Изменение микротвердости закаленной и деформированной Ф-П зоны ребра при частичной закалке в зависимости от температуры отпуска.

Выводы

1. К основным параметрам получения и управления структурами с закаленными зонами относятся режимы резания и геометрические параметры режущего клина инструмента ДР.
2. Главными параметрами получения закаленных структур является скорость резания, передний угол, угол при вершине в плане инструмента. Выбор соотношения подачи и глубины резания определяет тип получаемой структуры со сквозной или частичной закалкой ребра. Сквозную закалку ребра возможно получить при малых значениях подачи $S \leq 0,2$ мм/об инструмента и значительной скорости резания $V \geq 3$ м/с. Для осуществления частичной закалки значение подачи необходимо увеличить до значений $S > 0,2$ мм/об.
3. Металлографическим анализом установлено протекание фазовых превращений при высокоскоростном нагреве (скорость нагрева 10^6 °C/сек) и охлаждении со скоростью выше критической при одновременном влиянии пластической деформации.
4. Сравнительные результаты измерений микротвердости свидетельствуют о высокой дисперсности структур мартенсита, полученного при ДР и продуктов его распада во всем диапазоне температур отпуска.
5. Экстремально высокие скорости нагрева и охлаждения при ДР приводят к формированию особых структур, которые требуют более глубокого изучения различными методами физико-химического анализа и механических испытаний.

Список литературы

1. Гуляев А.П. Материаловедение. М.: Металлургия, 1986. 544 с.

2. Зубков Н.Н. Особенности реализации метода деформирующего резания // Технология машиностроения. 2001. № 1. С.19-26.
3. Зубков Н.Н. Разработка и исследование метода деформирующего резания как способа формообразования развитых макрорельефов: дис. ... докт. техн. наук. М., 2001. 478 с.
4. Зубков Н.Н., Овчинников А.И. Способ получения поверхностей с чередующимися выступами и впадинами и инструмент для его реализации: пат. 2044606 РФ. 1994. Бюл. № 27.
5. Зубков Н.Н. Ремонт, восстановление и модернизация на основе метода деформирующего резания // Ремонт, восстановление, модернизация. 2003. № 10. С. 7-11.
6. Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Васильев С.Г., Симонов В.Н., Хасанян М.А. Способ упрочнения поверхности детали: пат. 2015202 РФ. 1994.
7. Зубков Н.Н., Васильев С.Г. Повышение износостойкости деталей пар трения на основе метода деформирующего резания // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 8. С. 3-9.
8. Васильев С.Г., Попцов В.В. Повышение твёрдости поверхности детали термическим воздействием с использованием деформирующего резания // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2011. № 12. С. 37-43.
9. Багмутов В.П., Паршев С.Н., Дудкина Н.Г., Захаров И.Н. Электромеханическая обработка: технологические и физические основы, свойства, реализация. Новосибирск: Наука, 2003. 318 с.
10. Евдокимов В.Д., Клименко Л.П., Евдокимова А.Н. Технология упрочнения машиностроительных материалов. Киев: Изд-во «Профессионал», 2006. 352 с.
11. Kevin Chou Y. Surface hardening of AISI 4340 steel by machining: a preliminary investigation // Journal of Materials Processing Technology. 2002. Vol. 124, iss. 1-2. P. 171-177. DOI: [10.1016/S0924-0136\(02\)00132-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00132-2)

Formation of Quenching Structures in the Steel 35 by Deform Cutting

A.G. Degtyareva^{1,*}, V.V. Poptsov¹, V.N. Simonov¹,
V.G. Vasilev¹, S.B. Varlamova²

* dega_70@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²OA "Kompozit", Korolev city, Moscow region, Russia

Keywords: surface strengthening, mechanothermal treatment, quenching structures, through hardening partial surface hardening, microhardness

In industry different methods of surface hardening are widely used to increase reliability and durability of friction unit parts. Among these methods are areas of focus based on deform-cutting technology (DC) i.e. method of chip-free mechanical treatment.

It is shown that DC method allows us to produce through- or partial-hardening surface layers of a large thickness (0,4...1.5mm) on steel with no additional heat sources. The standard metal-cutting equipment and common tools are used for deform-cutting process.

The significant heat generation in the deform-cutting zone and mechanical effect from the tool allow us to heat undercut layers to the phase transformation point to have the hardening structure as a result of heat removal to the cold bulk. The hardening structure formation occurs at significant heating and cooling rate (10^6C/c) with large degrees and rates of strain.

The deform-cutting modes and working face tool grinding determine the type and properties of the hardening structure. To produce the hardening structure would require the heat transfer and force action augmentation while treatment.

These researches deal with through- and partial surface hardening samples produced by turning steel 35 shafts. While through hardening the phase transformation carry among the whole thickness of the undercut layer; while partial hardening the hardening interlayer formed on the side of the cutting tool contact.

The depth of hardening zone of samples with through hardening layers is 0,5 mm; the depth of hardening zone of partial hardening samples is 0,8 mm. Micro-hardness of the through hardening layers is 653 HV0,1 and 485 HV0,1 for the partial hardening layers. The metallographic analysis shows that the hardening zone formed while deform cutting has disperse structure; there are ferrite ghosts in it.

The tempering at temperatures of 200 – 700C showed that the micro-hardness of the hardening structures formed while deform cutting is larger than the micro-hardness of the samples after quenching.

There special structures formed while deform cutting demand more in-depth study using different methods of physical-chemical analysis and mechanical testing.

References

1. Guliaev A.P. *Materialovedenie* [Materials Science]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 544 p. (in Russian).
2. Zubkov N.N. Features of the implementation of the method of deforming cutting. *Tekhnologiya mashinostroeniia*, 2001, no. 1, pp.19-26. (in Russian).
3. Zubkov N.N. *Razrabotka i issledovanie metoda deformiruiushchego rezaniia kak sposoba formoobrazovaniia razvitykh makrorel'efov. Dokt. diss.* [Development and research of the deforming cutting method as a way of forming the developed macro-pattern. Dr. diss.]. Moscow, 2001. 478 p. (in Russian).
4. Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I. *Sposob polucheniia poverkhnosti s chereduiushchimisia vystupami i vpadinami i instrument dlia ego realizatsii* [Method of producing a surface with alternating ridges and depressions and a tool for carrying out the said method]. Patent RF, no. 2044606, 1994. (in Russian).
5. Zubkov N.N. Repair, reconditioning and modernization on the basis of a method of deforming cutting. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiia = Repair, Reconditioning, Modernization*, 2003, no. 10, pp. 7-11. (in Russian).
6. Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I., Vasil'ev S.G., Simonov V.N., Khasanian M.A. *Sposob uprochneniia poverkhnosti detaili* [The method of surface hardening of part]. Patent RF, no. 2015202, 1994. (in Russian).
7. Zubkov N.N., Vasil'ev S.G. Wear resistance improvement based on deformational cutting. *Uprochniaiushchie tekhnologii i pokrytiia*, 2013, no. 8, pp. 3-9. (in Russian).
8. Vasil'ev S.G., Poptsov V.V. Increasing a workpiece surface hardness by thermal effect using macro-deformation process. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2011, no. 12, pp. 37-43. (in Russian).
9. Bagmutov V.P., Parshev S.N., Dudkina N.G., Zakharov I.N. *Elektromekhanicheskaia obrabotka: tekhnologicheskie i fizicheskie osnovy, svoistva, realizatsiia* [Electro-mechanical processing: technology and physical fundamentals, properties, realization]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2003. 318 p. (in Russian).

10. Evdokimov V.D., Klimenko L.P., Evdokimova A.N. *Tekhnologiya uprochneniia mashinostroitel'nykh materialov* [Hardening technology of engineering materials]. Kiev, Professional Publ., 2006. 352 p. (in Russian).
11. Kevin Chou Y. Surface hardening of AISI 4340 steel by machining: a preliminary investigation. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 124, iss. 1-2, pp. 171-177. DOI: [10.1016/S0924-0136\(02\)00132-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00132-2)