Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2018 Том 20 № 2 с. 35–49
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-35-49

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Особенности закалочного деформирующего резания

Николай Зубков [1, a,*], *Сергей Васильев* [1, b], *Виктор Попцов* [2, c]

[1] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, г. Москва, 105005, Россия
[2] ООО «Секо Тулс», ул. Малая Грузинская, 3, г. Москва, 123242, Россия

[a] http://orcid.org/0000-0003-3757-1299, zoubkovn@bmstu.ru, [b] http://orcid.org/0000-0002-8882-4893, sergv@bmstu.ru,
[c] http://orcid.org/0000-0002-8938-8210, poptsov-v.v@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.785

История статьи:
Поступила: 12 марта 2018
Рецензирование: 29 марта 2018
Принята к печати: 25 апреля 2018
Доступно онлайн: 15 июня 2018

Ключевые слова:
Деформирующее резание
Поверхностная закалка
Фазовый переход
Твердость
Износостойкость
Скорость нагрева

Финансирование:
Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки России (Грант № 9.5617.2017 / ВУ).

АННОТАЦИЯ

Введение. Эффективным методом повышения износостойкости деталей машин является поверхностная закалка. Использование непосредственно металлорежущего оборудования для нагрева материала детали в процессе абразивной или лезвийной обработки является новым перспективным направлением в методах поверхностной закалки. Нагрев обрабатываемой поверхности достигается в процессе резания за счет пластических деформаций и трения между инструментом и заготовкой и сопровождается отделением стружки. Существует также относительно новый метод деформирующего резания (ДР), основу которого составляет как процесс резания, так и целенаправленное деформирование подрезанного слоя. В отличие от известных методов поверхностной закалки точением или шлифованием закалка ДР производится без отделения материала заготовки в виде стружки. Подрезанный слой остается на поверхности в виде плотно уложенных слоев, прочно прикрепленных к основе. **Цель работы**: апробация метода деформирующего резания как средства поверхностного закалочного упрочнения. Задача работы заключалась в выявлении основных закономерностей и особенностей такой поверхностной закалки. **В работе исследованы** закаленные слои на наружной поверхности стальных образцов, полученных методом ДР с толщиной закаленного слоя до 0,6 мм на сталях 20,35, 40Х. **Методами исследования** являются металлографическое изучение закаленной структуры, в том числе распределение твердости, измерение сил и температур закалочного ДР, проведение сравнительных триботехнических испытаний. **Результаты и обсуждение.** Для ДР используется специальный инструмент, обеспечивающий процесс резания главной режущей кромкой и исключающий процесс резания на вспомогательной кромке, являющейся деформирующей. При ДР подрезаемый слой интенсивно деформируется, нагревается и охлаждается за счет теплоотвода в сердцевину заготовки. Это приводит к образованию на поверхности закаленных наклонных тонких ребер, имеющих прочную связь с основой и плотно скрепленных друг с другом. Показано, что при закалочном ДР достигаются температуры подрезанного слоя, достаточные для структурно-фазовых превращений в сталях. Установлено, что скорости нагрева составляют более двух миллионов градусов Цельсия в секунду при сверхвысоких степенях и скоростях деформации, сопровождающих процесс ДР. Указанные условия при высоких скоростях охлаждения приводят к образованию упрочненных структур повышенной твердости и износостойкости. Показана возможность получения закалочных структур с толщиной упрочненного слоя до 1 мм, в том числе состоящих из чередования наклонных слоев различной твердости, аналогичных по строению с дамасской сталью. Экспоненциального падения твердости по толщине упрочненного слоя, характерного для всех методов поверхностной закалки, при ДР не наблюдается. Метод закалочного ДР имеет уникальные возможности воздействия на материал заготовки, соизмеримые со взрывными процессами по плотности мощности, развиваемым давлениям и скоростям нагрева. Образцы, закаленные ДР, показали преимущества по износостойкости по сравнению с образцами объемной закалки. Закалка поверхностного слоя детали с использованием метода ДР экономически целесообразна, имеет высокую производительность, низкое энергопотребление, позволяет отказаться от традиционных операций термообработки, требующих дорогостоящего специального оборудования, что в целом подтверждает перспективность развиваемого подхода закалки поверхностного слоя деталей.

Для цитирования: *Зубков Н.Н., Васильев С.Г., Попцов В.В.* Особенности закалочного деформирующего резания // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 35–49. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-35-49.

***Адрес для переписки**
Зубков Николай Николаевич, д.т.н., профессор,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1,
105005, г. Москва, Россия
Тел. раб.: +7-499-263-6486,
Тел. моб.: +7-916-607-7948, **e-mail**: zoubkovn@bmstu.ru

Введение

Поверхностная закалка обработкой резанием

Поверхностная закалка является одним из эффективных и экономичных методов повышения износостойкости деталей машин. Повышение износостойкости актуально для машин и механизмов, работающих в условиях высоких контактных нагрузок, высоких скоростей относительного движения и в условиях абразивного воздействия [1]. Большинство существующих технологий поверхностной закалки требуют специализированного оборудования [2]. Относительно новым методом закалочного поверхностного упрочнения является закалка режущим инструментом непосредственно на металлообрабатывающем оборудовании. Температура, необходимая для закалки, достигается в процессе резания за счет пластической деформации и трения в зоне контакта между инструментом и заготовкой. Комбинированный эффект больших пластических деформаций, высоких локальных температур и быстрой скорости охлаждения приводит к физическим преобразованиям материала обрабатываемой поверхности [3].

В литературе описаны способы закалки резанием как лезвийным, так и абразивным инструментом. В работах [4 и 5] для увеличения трения инструмента о поверхность заготовки использовались резцы с нулевым значением главного заднего угла. В работе [6] для увеличения температуры в зоне резания использовались резцы с отрицательным значением переднего угла.

Для поверхностной закалки механической обработкой также используется шлифование, основанное на форсированных режимах, что приводит к повышенному тепловыделению и разогреву обработанной поверхности до закалочных температур. Закалочным шлифованием упрочняют стали с содержанием углерода более 0,3 %, при этом глубина закалки составляет 0,3…0,5 мм (после удаления дефектного слоя) с твердостью поверхности до 50…60 HRC, а зона термического воздействия достигает величины до 2 мм [3 и 7]. Форсирование режимов производят назначением глубины шлифования за один проход до 0,2…1,2 мм/дв.х, при продольной подаче шлифовального круга от 0,3 до 1,2 м/мин. При закалочном шлифовании применение охлаждающих жидкостей не обязательно, поскольку быстрое охлаждение достигается за счет отвода тепла в нижележащие слои холодной заготовки [8]. Станкостроительной компанией DMG MORI SEIKI выпускаются фрезерно-шлифовальные центры с ЧПУ, в которых предусмотрена операция закалки шлифовальным кругом. Производительность закалки составляет 0,4...1,5 см^2/с [9].

К способам поверхностной закалки лезвийным инструментом относится метод деформирующего резания (ДР) [10], имеющий подтвержденные данные в успешном получении закалочных структур на наружной поверхности стальных заготовок [11]. ДР является методом механической обработки, использующий в качестве инструмента резец со специальной геометрией заточки его режуще-деформирующей части. Подрезанные слои не отделяются полностью от заготовки, а остаются на ней и сохраняют прочную механическую связь с обработанной поверхностью. На наружной поверхности заготовки формируется регулярный макрорельеф в виде ребер, отстоящих друг от друга с межреберным зазором, либо плотно прижатых друг к другу. При соответствующих режимах ДР температура, выделяющаяся в зоне обработки, может быть достаточна для протекания структурно-фазовых превращений в материале подрезаемого слоя. Последующее быстрое охлаждение ребер теплоотводом в сердцевину заготовки, как и при лазерной закалке, приводит к получению в ребре закалочных структур.

Метод деформирующего резания имеет широкую область использования [12]. Макрорельеф в виде оребрения или штырьков увеличивает площадь обрабатываемой поверхности до 12 раз, что позволяет повысить коэффициент теплоотдачи при использовании таких поверхностей в теплообменной аппаратуре [13]. ДР используют при изготовлении капиллярно-пористых структур тепловых труб [14], неразъемных соединений [15, 16], фильтрующих труб и микросеток [17], а также во многих других областях техники.

Применение метода ДР для упрочнения сталей

Известно, что на операции точения сходящая стружка может нагреваться до температур, пре-

вышающих температуры фазовых превращений в сталях, что приводит к ее закалке. При токарной обработке практически вся потребляемая мощность главного привода расходуется на нагрев зоны резания, которая имеет объем десятые доли кубического миллиметра. Таким образом, механическая энергия, приложенная извне, локализуется в пределах зоны резания, состоящей из зоны пластических деформаций подрезанного слоя и зоны трения подрезанного слоя с рабочими поверхностями режущего инструмента. Как пример, при обработке стали AISI 1045 со скоростью резания V = 2,7 м/с температура в зоне резания может достигать 1030 °С при степени деформации до 400 % и скорости деформации до 10^4 $с^{-1}$ [18]. Скорость нагрева может составлять до 10^6 °С/с при скорости охлаждения 10^3 °С/с [19].

При ДР скорости охлаждения материала ребра, необходимые для закалки, достигаются благодаря кондуктивному теплоотводу через основание ребра в более холодную сердцевину заготовки. Аналогичный метод достижения закалочных скоростей охлаждения без применения охлаждающих сред используется в таких методах термической обработки, как лазерная и плазменная закалка [20].

Иллюстрация процесса деформирующего резания при формировании закаленного поверхностного слоя на наружной поверхности заготовки представлена на рис. 1. Инструмент для ДР *1* имеет одну режущую *3* и одну деформирующую кромку *4*. При равномерном продольном перемещении инструмента *1* вдоль наружной поверхности заготовки *2* с выбранной подачей, глубиной и скоростью резания режущая кромка *3* подрезает слой металла *5*, который перемещается по передней поверхности *6* инструмента *1* с последующим его деформированием деформирующей кромкой *4* без его отделения от обработанной поверхности заготовки. Отделения подрезаемого слоя от заготовки и схода его в виде стружки не происходит благодаря большому отрицательному переднему углу на деформирующей кромке.

Для ДР имеются характерные зоны тепловыделения. К ним относятся зоны пластических деформаций в области режущей и деформирующей кромок, а также зоны трения подрезанного слоя по передней, главной и вспомогательной

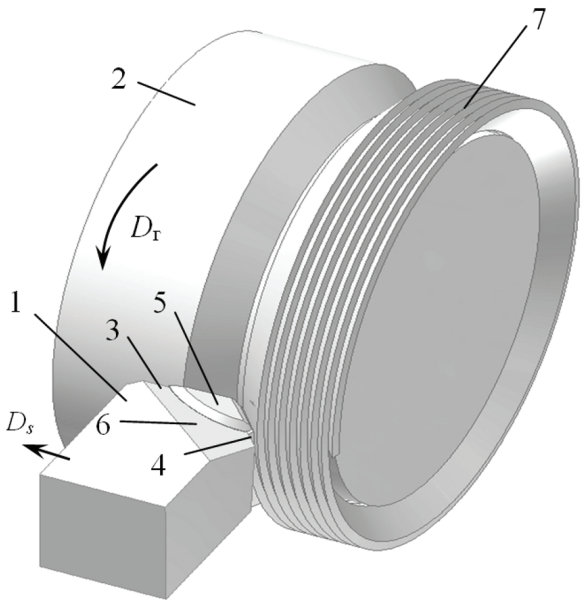


Рис. 1. Принцип закалочного ДР:

1 – инструмент для ДР; *2* – заготовка; *3* – режущая кромка; *4* – деформирующая кромка; *5* – подрезаемый слой; *6* – передняя поверхность инструмента; *7* – упрочненные ребра

Fig. 1. Concept of quench DC hardening:

1 – DC tool; *2* – workpiece; *3* – cutting edge; *4* – deforming edge; *5* – undercut layer; *6* – tool rake face; *7* – hardened fins

задней поверхностям. Основное тепловыделение при ДР приходится на зону пластических деформаций в области режущей кромки и зону трения подрезанного слоя с передней поверхностью инструмента. Именно эти зоны нагрева определяют возможность достижения закалочных температур материала подрезаемого слоя. Сам процесс закалочного ДР для валов реализуется по схеме наружного продольного точения, но без образования стружки. На рис. 2 представлена фотография процесса закалочного ДР.

Схема формирования закаленного слоя методом ДР изображена на рис. 3. При закалочном ДР создается оребрение в виде плотно прижатых друг к другу ребер, которые сохраняют механическую связь с заготовкой. Пунктирная линия на рис. 3 обозначает контур инструмента при его предыдущем положении, отстоящем на величину продольной подачи на один оборот заготовки. Подрезаемый слой металла главной режущей кромкой ВН обозначен контуром *ABCD*. В процессе ДР он перемещается по передней поверхности инструмента в направлении, указанном стрелкой и является будущим ребром, имеющим механическую связь с заготовкой. Деформирую-

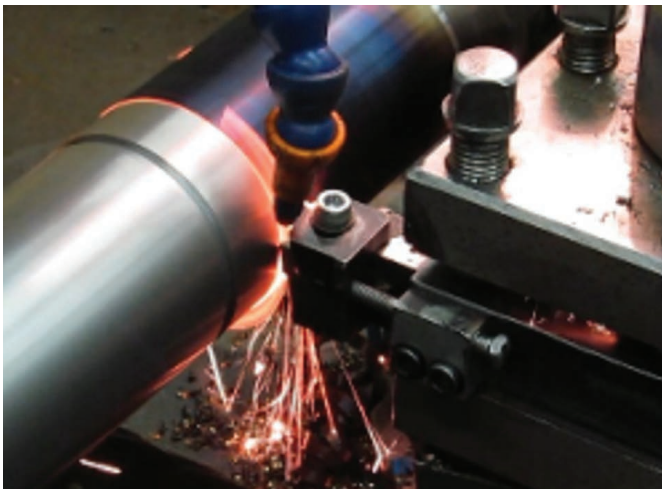


Рис. 2. Фотография процесса закалочного ДР

Fig. 2. Photo of DC quenching

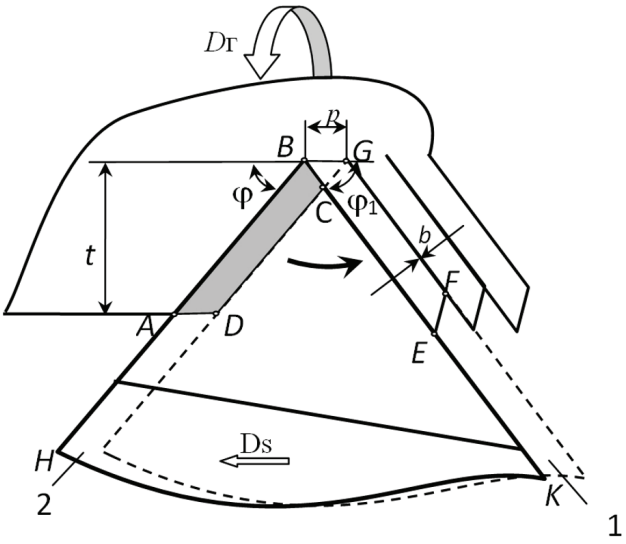


Рис. 3. Формирование ребер методом ДР с нулевым межреберным зазором *b*

Fig. 3. DC Finning with zero interfin gap *b*

щая кромка ВК определяет окончательное положение подрезанного и упрочненного в процессе закалочного ДР слоя, и обозначена контуром *BEFG*. Величина межреберного промежутка *b* зависит от соотношения главного и вспомогательного углов в плане и определяется выражением [17]

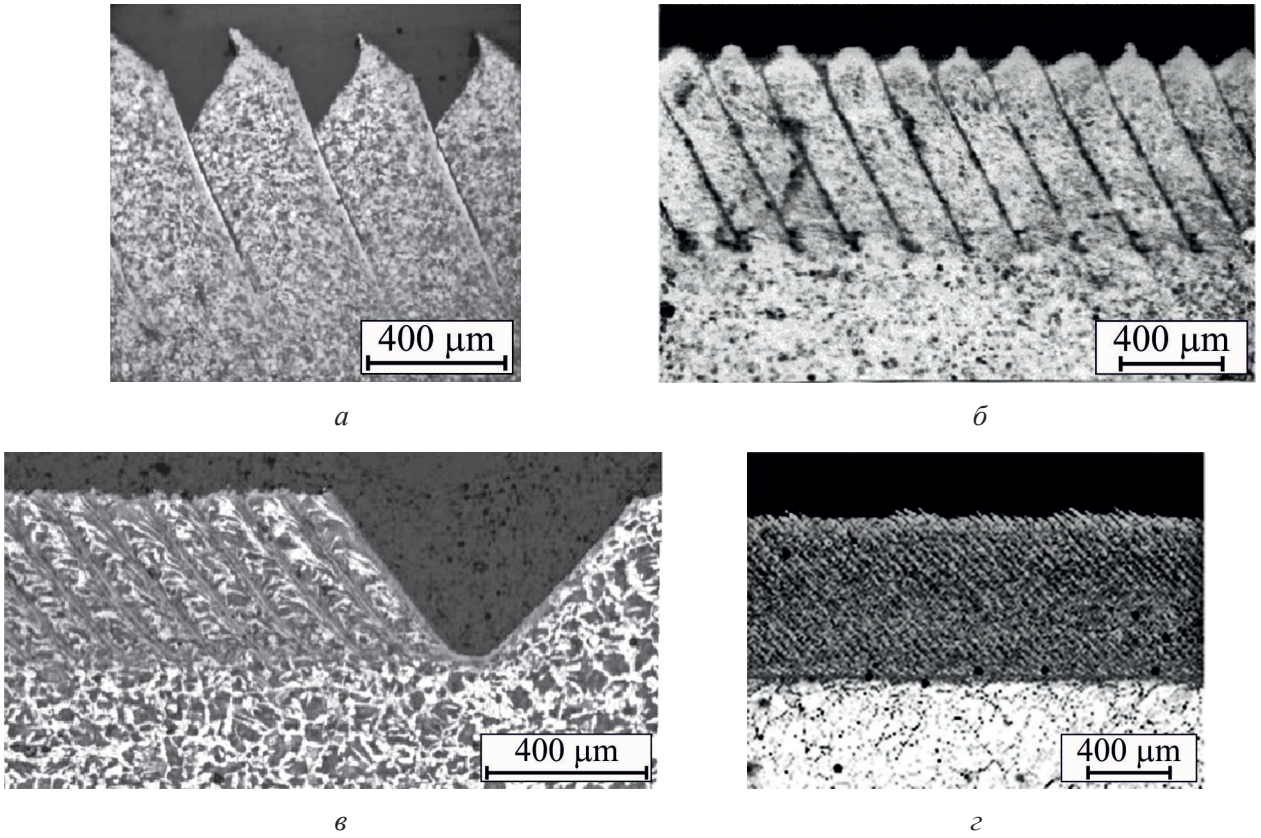
$$b = p\sin\varphi_1 - p\sin\varphi = p(\sin\varphi_1 - \sin\varphi).$$

При условии, когда углы φ и φ_1 равны, межреберный зазор *b* теоретически равен нулю. Это означает, что при выполнении данного соотношения возможно получить на наружной поверхности детали плотно упакованную структуру без зазоров с плотно прижатыми друг к другу ребрами. Такая структура является беспористой, и после удаления треугольных заострений имеет несущую способность рабочей поверхности как у сплошного материала. Для целей закалочного упрочнения целесообразно использовать именно оребрение с межребреным зазором, равным нулю, т. е. плотно упакованные ребра. На рис. 4 показаны варианты упрочненных поверхностей с нулевой величиной межреберного зазора, сформированных методом ДР на различных сталях с разной величиной подачи *p*.

При условии достижения температур, необходимых для структурно-фазовых превращений по всему сечению подрезанного слоя обеспечивается получение полностью закаленного поверхностного слоя детали (рис. 5, *а*). Поскольку при ДР имеются два основных источника нагрева подрезаемого слоя, то возможен вариант, когда только прирезцовая часть подрезанного слоя из-за интенсивного трения с инструментом достигнет закалочных температур, поскольку наибольшая температура подрезанного слоя возникает в зоне, контактирующей с передней поверхностью инструмента. В этом случае обеспечивается получение упрочненной структуры с твердыми закаленными и более мягкими слоями (рис. 5, *б*), т. е получение упрочненных структур с ребрами, частично закаленными по своей толщине. Чередующиеся тонкие слои различной твердости напоминают строение дамасской стали. Целью и задачами данной работы является выявление основных закономерностей и особенностей закалочного деформирующего резания.

Методика исследований

Эксперименты по закалочному ДР проводились на заготовках из ферритно-перлитных сталей марок 20, 35 и 40Х в виде проката диаметром 60…80 мм. Использовался токарно-винторезный станок 16К20 мощностью привода главного движения 11,0 кВт с максимальной частотой вращения шпинделя 1600 об/мин. Инструмент для ДР в виде токарного резца затачивался из оксидной керамики марки ЦМ332 (Al_2O_3 + 0,8 % MgO) и твердого сплава Т15К6 (79 % WC, 15 % TiC, 6 % Co) с главным углом инструмента в плане, равным φ = 42°, и передним углом,



а *б*

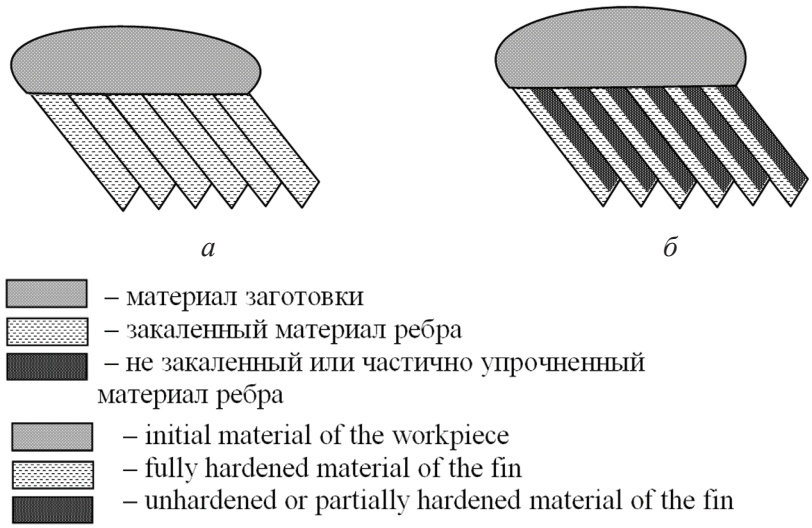
в *г*

Рис.4. Примеры оребрения, полученного ДР с нулевым межреберным зазором:

а – сталь 30ХГСА, шаг структуры p = 0,4 мм; *б* – сталь 20Х13, шаг структуры p = 0,2 мм; *в* – сталь 35, шаг структуры p = 0,1 мм; *г* – АРМКО-железо, шаг структуры p = 0,05 мм

Fig. 4. Examples of DC finning on steels with a zero interfin gap:

а – steel 30KhGSA (analogue AISI 4140), pitch p = 0.4 mm; *б* – steel 20Kh13 (analogue AISI 420), pitch p = 0.2 mm; *в* – steel 35 (analogue AISI 1035), pitch p = 0.1 mm; *г* – armco-iron, pitch p = 0.05 mm



а *б*

Рис. 5. Варианты структур, получаемых закалочным ДР:

а – полностью закаленные ребра; *б* – ребра, закаленные не полностью по своей толщине

Fig. 5. Variants of structures obtained by quench DC:

а – fully hardened fins; *б* – partially hardened fins over their thickness

равным $\gamma = -18°$. Скорость резания V варьировалась от 3 до 5 м/с, подача инструмента на оборот шпинделя составляла p = 0,05…0,4 мм/об, глубина резания составляла t = 1,0…2,0 мм.

Измерения среднеинтегральной температуры зоны контакта инструмент – подрезаемый слой проводились при использовании резца из Т15К6 методом естественной термопары.

Измерения главной составляющей силы резания осуществлялись с помощью динамометра Kistler (Швейцария) модели 9255B.

Измерения температуры наружной поверхности подрезаемого слоя ребра выполнялись с использованием термографа марки ИРТИС-2000 (Россия) с разрешением 200 мкм между двумя измеряемыми точками на расстоянии 200 мм от объекта измерения. Точность измерения составляла +/– 1 % от измеряемого диапазона, калибровка проводилась непрерывно при измерении температуры встроенным в термограф черным телом. Диапазон измеряемых температур термографом составлял от –60 до +1700 °С.

Металлографические исследования закаленной структуры осуществлялись на стандартно-подготовленных шлифах визуально на оптическом микроскопе серии Olympus GX51 (Japan). Измерения микротвердости проводились в автоматическом режиме твердомером модели EMCOTEST DuraScan 70 (Швейцария) при нагрузке на алмазный индентор 100 г.

Сравнительные триботехнические испытания закаленных образцов из стали 40Х проводились на модернизированной машине трения типа Амслер А135. Подготовка образцов к испытаниям выполнялась по методике, описанной в [28]. Испытания проводились по схеме «диск–диск» с относительной скоростью проскальзывания 0,08 м/с и нагрузкой на образец 185 Н. В качестве контртела использовался диск из твердого сплава марки ВК8 (92 % WC, 8 % Co) твердостью 87,5 HRA. В зону трения капельной подачей (4…6 капель в минуту) подавалось индустриальное масло марки И20А. Линейный износ дорожки трения на наружной поверхности испытуемого образца измерялся индикатором часового типа с ценой деления 1 мкм. Измерения износа осуществлялись с равными промежутками времени в интервале одного часа. Интенсивность изнашивания W для каждого эксперимента рассчитывалась по формуле

$$W = \Delta h/L,$$

где Δh [мм]– линейный износ; L [мм]– длина пути трения.

При закалке ДР испытывались образцы без отпуска и с дополнительным низким отпуском (200 °С в течение 40 мин). Испытания на трение закаленных ДР образцов, сравнивались с образцами, изготовленными из той же стали по стандартной технологии объемной закалки с последующим низким отпуском при указанной выше температуре и времени отпуска.

Результаты и их обсуждение

Результаты получения полностью закаленной структуры методом ДР на наружной поверхности заготовки приведены в таблице. Продольные шлифы полученных упрочненных структур показаны на рис. 6.

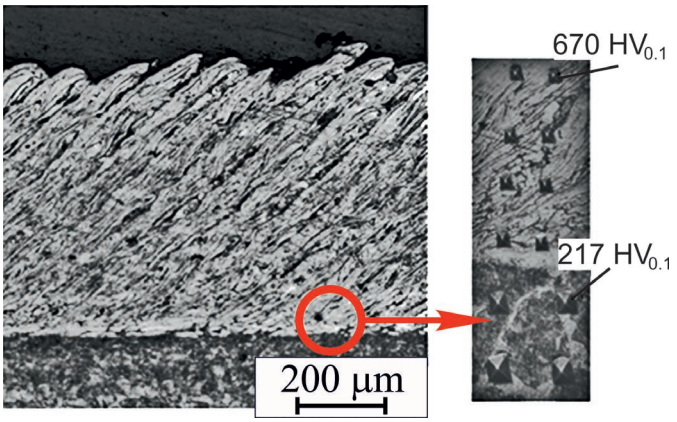
На рис. 7 показаны результаты распределения твердости по глубине упрочненного слоя на стали 35, созданного методом ДР при шаге оребренной структуры, равной 0,05 мм (кривая *1*), в сравнении с лазерной закалкой стали ASTM 4118 [21] (кривая *2*). Отличительной особенностью упрочненного слоя, созданного методом деформирующего резания, является относительное постоянство твердости на всей глубине упрочненного слоя, равного 0,6 мм. При лазерной закалке стали твердость упрочненного слоя уменьшается по глубине.

Скорость ДР существенно влияет на вид и структуру упрочненного слоя. Так, на стали 35 упрочненный слой, сформированный методом ДР, при скорости резания V= 5 м/с имеет сквозную закалку по всему сечению ребра с твердостью 670 $HV_{0,1}$ (59 HRC). При формировании упрочненного слоя с меньшими скоростями резания только часть ребра, находящаяся в непосредственном контакте с инструментом, достигает температуры, необходимой для структурно-фазовых превращений. Таким образом, снижение скорости или повышение толщины подрезаемого слоя приводят к образованию слоистой структуры, состоящей из наклонных слоев различной твердости. На рис. 8 показаны примеры получения слоистой структуры с различным соотношением толщины полностью закаленного (твердость 560 $HV_{0,1}$) и частично упрочненного (твердость 360 $HV_{0,1}$) слоя. Для примера,

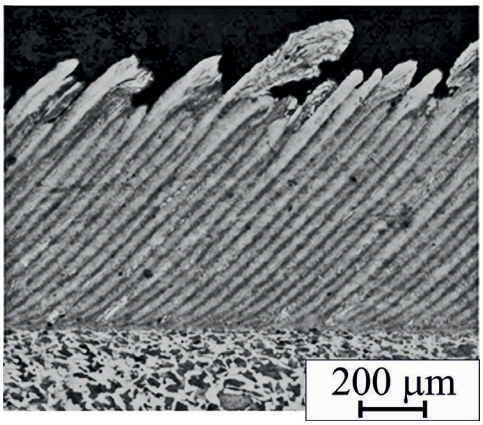
Результаты поверхностной закалки методом ДР

Results of DC quench

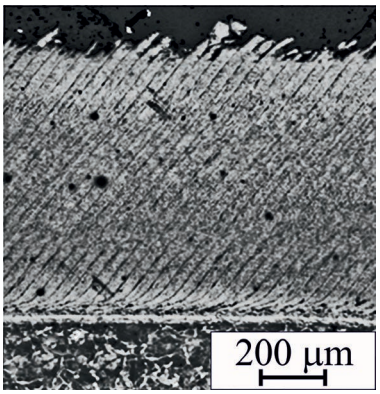
Марка стали/ Steel grade	Подача *p*, мм/ об/ Feed mm/turn	Исходная твердость HB ($HV_{0,1}$)/ Initial hardness HB ($HV_{0.1}$)	Средняя твердость после закалки $HV_{0,1}$ / Average hardness after quenching $HV_{0.1}$	Перевод твердости $HV_{0,1}$ в HRC / Hardness conversion $HV_{0.1}$ to HRC	Скорость резания *V*, м/с / Cutting speed *V*, m/s	Глубина резания *t*, мм / Cutting depth *t*, mm	Рисунок / Figure
Сталь 20	0,1	190 (190)	464	46	3,5	1,5	
Сталь 35	0,05	207 (207)	650	58	4,3	1,0	6, *б*
Сталь 35	0,15	207 (207)	670	59	4,7	2,0	6, *а*, 6, *г*
Сталь 40Х	0,05	190 (190)	680	59	5,0	1,1	6, *в*
Сталь 40Х	0,1	190 (190)	760	63	5,0	1,5	



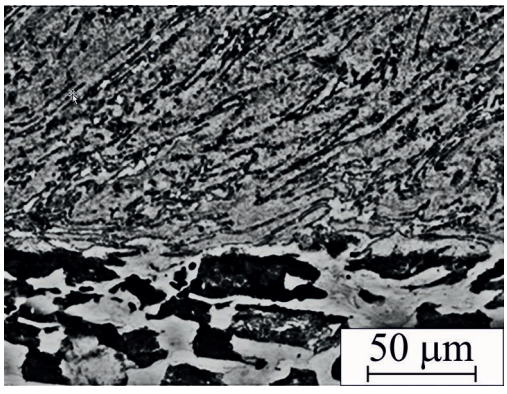
а



б



в



г

Рис. 6. Сквозная закалка ДР по толщине ребра:

а – сталь 35, *p* = 0,15 мм, 670 $HV_{0,1}$; *б* – сталь 35, *p* = 0,05 мм, 650$HV_{0,1}$; *в* – сталь 40Х, *p* = 0,05 mm, 680HV0,1; *г* – сталь 35, *p* = 0,15 мм, 670 $HV_{0,}$1 с большим увеличением

Fig. 6. Full DC quenching over the fin thickness:

а – steel 35, *p* = 0.15 mm, 670 $HV_{0.1}$; *б* – steel 35, *p* = 0.05 mm, 650$HV_{0.1}$; *в* – steel 40Kh, *p* = 0.05 mm, 680$HV_{0.1}$; *г* – steel 35, *p*=0.15 mm, 670 $HV_{0.1}$ with higher magnification

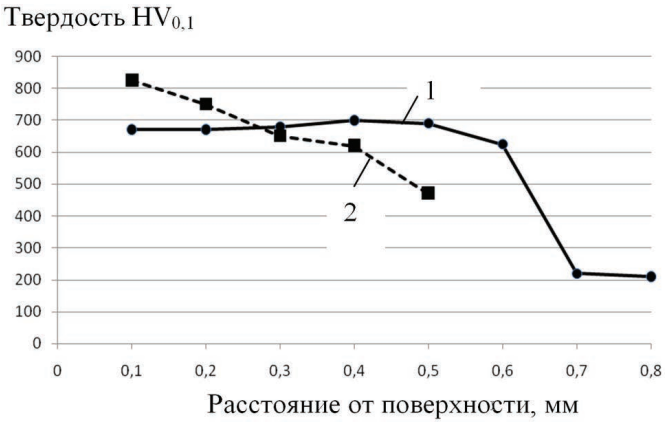


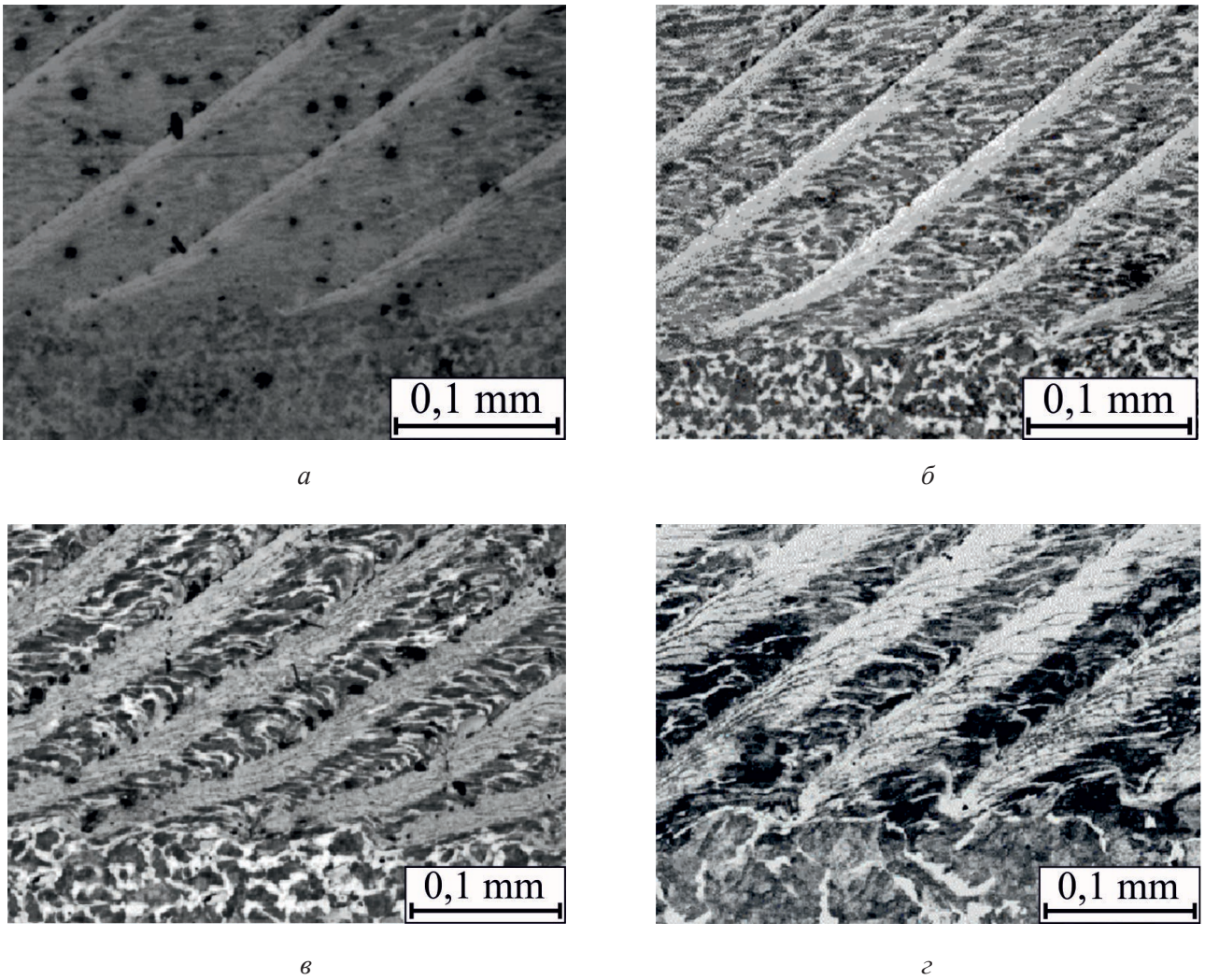
Рис. 7. Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя:
1 – закалочное ДР; *2* – лазерная закалка

Fig. 7. Hardness distribution along hardening depth:
1 – DC quenching; *2* – laser quenching

представленного на рис. 8, *а* это соотношение составило 1:8, для примера, изображенного на рис. 8, *б*, соотношение составило 1:6, для примера, показанного на рис. 8, *в* – 1:4 и для примера на рис. 8, *г* составило 1:2. Повышение твердости частично упрочненных слоев обусловлено в основном деформационным упрочнением без существенного влияния температурного фактора на упрочнение.

Обсуждение результатов

Проанализируем исследованный вариант закалочного ДР заготовки из стали 40Х диаметром 48 мм с подачей p = 0,1 мм/об, глубиной резания t = 1,0 мм, скоростью резания V = 3 м/с. Измерения главной составляющей силы резания



а *б*

в *г*

Рис. 8. Структуры закаленной ДР поверхности на стали 35 с различным соотношением толщины слоев, полностью и частично закаленных

Fig. 8. DC quenched structures on steel 35 with various ratios of fully and partially hardened fin material

динамометром Kistler 9255B дали показания P_z = 700 Н. Измерения температуры в зоне резания методом естественной термопары [22] дали значение T=1100 °С.

Объемный расход металла q, проходящий через зону деформирующего резания определялся по формуле

$$q = apV = 300 \text{ мм}^3/\text{с}.$$

Массовый расход металла G, проходящий через зону ДР, определялся по формуле

$$G = \rho q = 2{,}36 \text{ г/с},$$

где ρ = 7,85 г/см^3 – удельный вес стали 40Х.

Мощность, выделяемая в зоне деформирующего резания, определялась по формуле

$$N = P_z V = 2{,}4 \text{ кВт}.$$

Если предположить, что все тепло, выделяющееся в зоне обработки, идет на нагрев подрезаемого слоя, то температура ребра составит

$$T = N / C_p G = 1533 \text{ °С},$$

где C_p = 663 Дж/(кг·°С) – удельная теплоемкость среднеуглеродистой стали [23] в диапазоне температур от 20 до 1200 °С.

Рассчитанное значение температуры не совпадает со значением температуры, измеренной методом естественной термопары. Это объясняется тем, что не вся мощность, выделяемая в зоне обработки, расходуется на нагрев подрезанного слоя. Часть теплового потока уходит в инструмент, в окружающую среду за счет конвективного теплообмена и радиационного излучения, часть теплового потока идет непосредственно в заготовку, минуя подрезанный слой. При резании энергия также расходуется на упругие деформации, дробление зерен (увеличение границ раздела между зернами), на образование новых поверхностей, на образование дислокаций и их движение [24].

Время t нахождения металла в зоне нагрева (в зоне контакта с передней поверхностью инструмента) оценивалось по длине контакта подрезанного слоя с передней поверхностью инструмента и скоростью резания. Под длиной контакта принималась длина пластического контакта подрезаемого слоя между точками A и E (см. рис. 3) с учетом наклона передней поверхности инструмента. Для указанных условий обработки длина зоны контакта составляет 1,2 мм. Таким образом, время контакта определяется соотношением

$$t = d/V = 4{,}0 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$$

Именно за это время в зоне ДР происходит нагрев металла подрезаемого слоя до температур фазовых превращений и сами структурно-фазовые превращения.

Скорость нагрева металла от 20 до 1100 °С определялась по формуле

$$V_{\text{нагр}} = \Delta T/t = 2{,}7 \cdot 10^6 \text{ К/с}.$$

Расчетная скорость нагрева превышает скорость нагрева при лазерной закалке, которая в среднем составляет $1{,}0 \cdot 10^6$ °С/с [25].

Объемная плотность мощности Q, выделяемой в зоне обработки ДР вследствие пластических деформаций, внутреннего и внешнего трения, определяется как отношение мощности ДР N к объемному расходу материала q, подвергающегося обработке:

$$Q = N/q = 8{,}0 \text{ кДж/см}^3.$$

Это достаточно большая величина, которая превышает объемное выделение энергии при взрыве химических взрывчатых веществ, составляющая 4,5…7,5 кДж/см^3 [25].

Давление при ДР $P_{\text{ДР}}$ определялось соотношением главной составляющей силы резания P_z к сечению подрезанного слоя и определялось по формуле

$$P_{\text{ДР}} = P_z/(pt) = 7{,}0 \text{ ГПа}.$$

Давление в зоне контакта слоя металла с рабочими поверхностями инструмента при ДР сопоставимо с давлением, возникающим при взрыве, равным 10 ГПа [26]. Свойства материала и его поведение в таких экстремальных условиях сложно описать в рамках традиционного рассмотрения поведения материала. Для случая ДР возможно, что материал переходит в состояние сверхпластичности и течет как вязкая жидкость в зоне рабочих поверхностей режущего инструмента. На рис. 6, *г* показана микроструктура образца, где видно, что процесс упрочнения сопровождался сильной деформацией и растяжением зерен по всему объему.

Охлаждение нагретых слоев, как и при лазерной закалке, осуществляется за счет кондук-

тивного отвода тепла в тело заготовки. Скорость охлаждения при закалочном ДР оценивалась по разности температур на поверхности зоны резания, которая составила 900 °С, и температуры соседнего ребра через один оборот заготовки, составляющей 450 °С. Измерения проводились термографом IRTIS-2000C. При частоте вращения заготовки 1200 об/мин время, затрачиваемое на один оборот заготовки, составляет 0,05 с, что дает скорость охлаждения $V_{охл}$=9,0·10^3 °С/с. Данная скорость охлаждения выше, чем скорость охлаждения при лазерной закалке, которая в среднем составляет 10^3 °С/с [27]. Для ДР данная оценка – это оценка минимальной скорости охлаждения, поскольку термограф фиксировал температуру наружных слоев. Для слоев, находящихся ближе к основанию ребра, скорость охлаждения должна быть еще выше. В результате быстрого охлаждения со скоростью больше критической в поверхностной структуре образуется предположительно неоднородный мелкодисперсный мартенсит с включениями полигонизованного феррита.

Авторам не удалось добиться получения бездефектной поверхности закаленного вала. Как видно из фотографий поперечных срезов закаленной поверхности (рис. 6), самый верхний слой имеет дефекты в виде расслоений и наплывов. Данный факт пока является существенным недостатком, поскольку дефектный слой требует устранения твердым точением на том же станке, на котором производилась закалка, или отдельной операцией шлифования.

Оценка производительности закалки методом ДР проводилась на стальном валу диаметром 48 мм и составила 3 см^2/с закаленной поверхности в минуту, что в два раза выше производительности закалочного шлифования, которая составляет 0,4…1,5 см^2/с [9].

Проведенные триботехнические испытания образцов с упрочнением ДР подтвердили работоспособность предлагаемого метода в узлах трения скольжения. Результаты испытаний, представленные на рис. 9, показывают, что образцы, закаленные ДР, имеют износостойкость на 10…40 % больше по сравнению с образцами, изготовленными по стандартной технологии закалки [28]. Меньшие значения интенсивности изнашивания образцов, закаленных ДР, с последующим низким отпуском

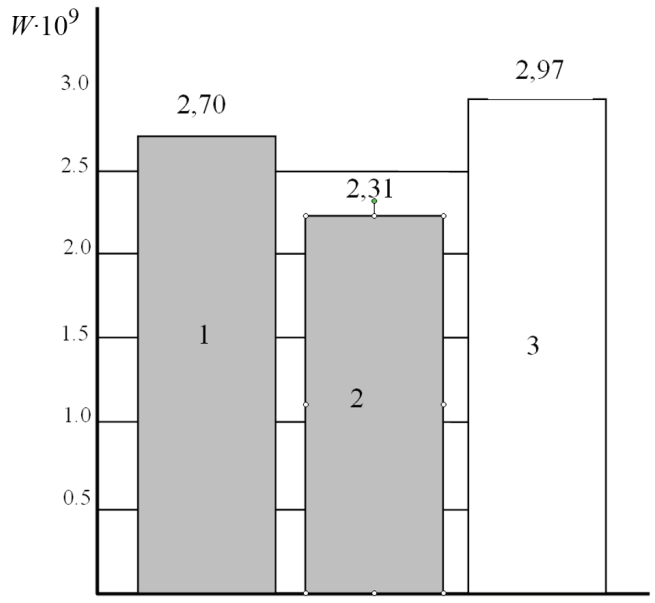


Рис. 9. Интенсивность изнашивания. Сталь 40Х [28]: *1* – закалка ДР без отпуска; *2* – закалка ДР с низкотемпературным отпуском; *3* – объемная закалка с низкотемпературным отпуском

Fig.9. Wear intensity. Steel 40Kh. [28]: *1* – after DC without tempering; *2* – after DC with low-temperature tempering; *3* – after standard oil quenching with low-temperature tempering

связаны со снижением остаточных напряжений и превращением остаточного аустенита в мартенсит отпуска.

Выводы

1. Упрочненный методом ДР слой на поверхности заготовки является непрерывной лентой закаленной стружки, имеющей прочную связь с основным материалом заготовки по своей узкой стороне, слои которой скреплены друг с другом по своей широкой стороне.

2. В отличие от известных методов закалки нагрев и структурно-фазовые превращения в материале при закалке методом ДР происходят при высоких давлениях, степени и скорости деформации и сверхвысоких скоростях нагрева.

3. Реализована возможность получения композитной слоистой закаленной структуры с тонкими наклонными слоями различной твердости.

4. По сравнению с лазерной закалкой распределение твердости по толщине закаленного слоя имеет равномерный характер.

5. Закалка методом ДР высокопроизводительна, имеет низкое энергопотребление, позво-

ляет устранить специализированное термическое оборудование и транспортные операции до термического цеха.

Список литературы

1. *Rajan T.V., Sharma C.P., Sharma A.* Heat treatment principles and techniques. – Delhi, India: PHI Learning, 2011. – 408 p. – ISBN 812030716X.

2. *Davis J.R.* Surface hardening of steels understanding the basics. – Materials Park, OH, USA: ASM International, 2002. 319 p. – ISBN 0871707640.

3. *Guo Y.B., Janowski G.M.* Microstructural characterization of white layers by hard turning and grinding // Transactions of NAMRI/SME. – 2004. – Vol. 32. – P. 367–374.

4. Упрочнение покрытий специальным точением / С. Скобло, В.В. Коломиец, В.Ф. Ридный, Р.В. Ридный // Вісник СевНТУ. – 2010. – № 110. – С. 208–211.

5. Experimental investigation of hard turning / S. Naik, C. Guo, S. Malkin, D.V. Viens, C.M. Pater, S.G. Reder // 2nd International Machining and Grinding Conference. – Dearborn, MI, 1997. – P. 224–308.

6. Surface layer microhardness changes with high-speed turning of hardened steels / J. Kundrak, A.G. Mamalis, K. Gyani, V. Bana // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2011. – Vol. 53 (1). – P. 105–112.

7. *Liu Z.Q., Ai X., Wang Z.H.* A comparison study of surface hardening by grinding versus machining // Key Engineering Materials. – 2006. – Vol. 304–305. – P. 156–160.

8. An investigation of the grinding-hardening induced by traverse cylindrical grinding / T. Nguyen, M. Liu, L. Zhang, Q. Wu, D. Sun // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2014. – Vol. 136 (5). – P. 051008-1–05100-10. – doi: 10.1115/1.4028058.

9. *Hyatt G.* Integration of heat treatment into the process chain of a mill turn center by enabling external cylindrical grind-hardening // Production Engineering – Research and Development. – 2013. – Vol. 7 (6). – P. 571–584. – doi: 10.1007/s11740-013-0465-3.

10. Patent 5775187 U.S. Method and apparatus of producing a surface with alternating ridges and depressions / N. Zoubkov, A. Ovtchinnikov. – N 8/545,640; appl. date 27.04.1994; publ. date 07.07.21998.

11. Патент 2556897 Российская Федерация. Способ поверхностного закалочного упрочнения режуще-деформирующим инструментом / Н.Н. Зубков, С.Г. Васильев, В.В. Попцов. – № 2014101642/02; заявл. 21.01.2014; опубл. 20.07.2015, Бюл. № 20.

12. *Kukowski R.* MDT – Micro deformation technology // Proceedings of ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. – Washington, DC, 2003. – P. 305–308.

13. Boiling heat transfer of different liquids on microstructured surfaces / I.A. Popov, A.V. Shchelchkov, N.N. Zubkov, R.A. Lei, Yu.F. Gortyshov // Russian aeronautics. – 2014. – Vol. 57, N 4. – P. 395–401. – doi: 10.3103/S1068799814040138.

14. Investigation of heat transfer in evaporator of microchannel loop heat pipe // A. Yakomaskin, V. Afanasiev, N. Zubkov, D. Morskoy // Journal of Heat Transfer. – 2013. – Vol. 135 (10). – Art. 101006. – doi: 10.1115/1.4024502.

15. Novel electrical joints using deformation machining technology. Part I: Computer Modeling / L. Solovyeva, N. Zubkov, B. Lisowsky, A. Elmoursi // IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology. – 2012. – Vol. 2 (10). – P. 1711–1717. – doi: 10.1109/TCPMT.2012.2207723.

16. Novel electrical joints using deformation machining technology. Part II: Experimental verification / L. Solovyeva, N. Zubkov, B. Lisowsky, A. Elmoursi // IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology. – 2012. – Vol. 2 (10). – P. 1718–1722. – doi: 10.1109/TCPMT.2012.2199755.

17. *Zubkov N.N., Sleptsov A.D.* Influence of deformational cutting data on parameters of polymer slotted screen pipes // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2016. – Vol. 138, N 1. – P. 011007-1–011007-7. doi: 10.1115/1.4030827.

18. *Klocke F.* Manufacturing processes. 1. Cutting. – Berlin: Springer, 2011. – 504 p. – ISBN 978-3-642-11978-1. – doi: 10.1007/978-3-642-11979-8.

19. *Chou S.K., Evans C.J.* White layers and thermal modeling of hard turning surfaces // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 1999. – Vol. 39. – P. 1863−1881.

20. *Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И.* Технологические процессы лазерной обработки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 663 с. – ISBN 978-5-7038-2701-7.

21. *Mohamad A.* Wear performance of a laser surface hardened ASTM 4118 Steel // Engineering and Technology Journal. – 2013. – Vol. 31, N 17. – P. 2335–2344.

22. *Маслов А.Р.* Резание металлов в современном машиностроении. – М.: ИТО, 2008. – 299 с. – ISBN 5-94275-049-1.

23. *Чиркин В.С.* Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – М.: Атомиздат, 1968. – 483 с.

24. *Davim P.* Machining of hard materials. – London: Springer, 2011. – 211 p. – ISBN 978-1-84996-449-4. – doi: 10.1007/978-1-84996-450-0.

25. *Burakowski T., Wierzchon T.* Surface engineering of metals: principles, equipment, technologies. – Boca

Raton, FL: CRC Press, 1998. – 592 p. – ISBN 978084938 2253.

26. *Altgilbers L.* Explosive pulsed power. – London, UK: Imperial College Press, 2011. – 596 p. – ISBN-10: 1848163223.

27. *Majumdar J.D., Manna I.* Laser-assisted fabrication of materials. – Berlin: Springer, 2013. – 485 p. – ISBN 978-1848163225.

28. Оценка триботехнических характеристик стали 40Х после закалки деформирующим резанием [Электронный ресурс] / С.Г. Васильев, А.Г. Дегтярева, Н.Н. Зубков, В.В. Попцов, В.Н. Симонов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2017. – № 11. – URL: http://engjournal.ru/articles/1698/1698.pdf (дата обращения: 14.05.2018). – doi: 0.18698/2308-6033-2017-11-1698.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2018 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2018 vol. 20 no. 2 pp. 35–49
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-35-49

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Features of Quench Deformational Cutting

Nikolai Zubkov [1, a, *], *Sergei Vasil'ev* [1, b], *Victor Poptsov* [2, c]

[1] Bauman Moscow State Technical University, 5 Baumanskaya 2-ya, Moscow, 105005, Russian Federation
[2] LLC "Seco Tools", 3 Malaya Gruzinskaya st., Moscow, 123242, Russian Federation

[a] http://orcid.org/0000-0003-3757-1299, zoubkovn@bmstu.ru, [b] http://orcid.org/0000-0002-8882-4893, sergv@bmstu.ru,
[c] http://orcid.org/0000-0002-8938-8210, poptsov-v.v@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 12 March 2018
Revised: 29 March 2018
Accepted: 25 April 2018
Available online: 15 June 2018

Keywords:
Quench deformational cutting
surface hardening
structural and phase transition
hardness
wear resistance
heat rating

Funding:
This work was supported by the Ministry of Education and Science of Russia (Grant № 9.5617.2017/VU).

ABSTRACT

Introduction. An effective method of increasing the wear resistance of machine parts is surface hardening. The direct use of metal-cutting equipment to heat the material of the part in the process of abrasive or edge cutting machining is a new promising direction in surface hardening methods. The heating of the surface is achieved in the cutting process due to plastic deformation and friction between the tool and the workpiece and is accompanied by a chip separation. There is also a relatively new method of deformational cutting (DC), which is based on both the cutting process and the targeted deformation of the cut layers. In contrast to the known methods of hardening the surface by turning or grinding, DC hardening is made without separation of the workpiece material as chips. The clipped layer remains on the surface in the form of tightly stacked layers firmly attached to the base. **The aim of the work:** testing the DC as a method of surface quenching, as well as the identification of the basic laws and features of such surface hardening. The hardened layers on the outer surface of steel samples obtained by the quench DC (QDC) with the thickness of the hardened layer up to 0.6 mm on steel 20, 35, 40Kh **are invesigated**. **Research methods** are metallographic tests of hardened structures, including the distribution of hardness, measurement of forces and temperature QDC and tribological tests. **Results and discussion.** For QDC the special tool is used, providing process of cutting by the main cutting edge and excluding process of cutting on an auxiliary edge. At QDC the undercut layers are intensively deformed, heated and after that cooled by heat transfer into the core of the workpiece. This leads to the formation of hardened inclined thin fins on the surface, having a strong bond with the base and tightly pressed against each other. In the article it is shown that at QDC temperature of the undercut layer sufficient for structural and phase transformations in steels is reached. It is established that the rate of heating is up to two million degrees Celsius per second at ultra-high degrees and rates of strain accompanying the QDC process. These conditions and high cooling rates lead to the formation of non-equilibrium nanostructures with increased hardness and wear resistance. The paper shows the possibility of obtaining quench structures with a thickness of the hardened layer up to 1 mm, including those consisting of alternating inclined layers of different hardness, similar in structure to Damascus steel. The exponential decrease in the hardness across the thickness of the hardened layer, common to all methods of surface hardening for QDC is not observed. The method of QDR has a unique ability to influence the material of the workpiece, comparable with the explosive processes in power density, developed pressures and heating rates. The samples are hardened, by QDC showed the advantages in wear resistance in comparison with samples of bulk hardening. Surface hardening of the part using the QDC method is economically feasible, because it has high performance, low power consumption and allows to abandon the traditional heat treatment operations that require expensive special equipment.

For citation: Zubkov N.N., Vasil'ev S.G., Poptsov V.V. Features of quench deformational cutting. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 35–49. doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-35-49. (In Russian).

References

1. Rajan T.V., Sharma C.P., Sharma A. *Heat treatment principles and techniques.* Delhi, India, PHI Learning, 2011. 408 p. ISBN 812030716X.

*** Corresponding author**
Zubkov Nikolai N., D.Sc. (Engineering), Professor
Bauman Moscow State Technical University
5 Baumanskaya 2-ya, Moscow, 105005, Russian Federation
Tel.: +7-916-607-7948, **e-mail:** zoubkovn@bmstu.ru

2. Davis J.R. *Surface hardening of steels understanding the basics*. Materials Park, OH, USA, ASM International, 2002. 319 p. ISBN 0871707640.

3. Guo Y.B., Janowski G.M. Microstructural characterization of white layers by hard turning and grinding. *Transactions of NAMRI/SME*, 2004, vol. 32, pp. 367–374.

4. Skoblo S., Kolomiets V.V., Ridnyi V.F., Ridnyi R.V. Uprochnenie pokrytii spetsial'nym tocheniem [Hardening of coatings by special turning]. *Visnik SevNTU – Journal of the Sevastopol National Technical University*, 2010, no. 110, pp. 208–211. (In Russian).

5. Naik S., Guo C., Malkin S., Viens D.V., Pater C.M., Reder S.G. Experimental investigation of hard turning. *2nd International Machining and Grinding Conference*, Dearborn, MI, 1997, pp. 224–308.

6. Kundrak J., Mamalis A.G., Gyani K., Bana V. Surface layer microhardness changes with high-speed turning of hardened steels. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 53 (1), pp. 105–112.

7. Liu Z.Q., Ai X., Wang Z.H. A comparison study of surface hardening by grinding versus machining. *Key Engineering Materials*, 2006, vol. 304–305, pp. 156–160.

8. Nguyen T., Liu M., Zhang L., Wu Q., Sun D. An investigation of the grinding-hardening induced by traverse cylindrical grinding. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2014, vol. 136 (5), pp. 051008-1–05100-10. doi: 10.1115/1.4028058.

9. Hyatt G. Integration of heat treatment into the process chain of a mill turn center by enabling external cylindrical grind-hardening. *Production Engineering – Research and Development*, 2013, vol. 7 (6), pp. 571–584. doi: 10.1007/s11740-013-0465-3.

10. Zoubkov N., Ovtchinnikov A. *Method and apparatus of producing a surface with alternating ridges and depressions*. Patent US, no. 5775187, 1998.

11. Zubkov N.N., Vasil'ev S.G., Poptsov V.V. *Sposob poverkhnostnogo zakalochnogo uprochneniya rezhushche-deformiruyushchim instrumentom* [Surface hardening by cutting-forming tool]. Patent RF, no. 2556897, 2015.

12. *Kukowski R.* MDT – Micro deformation technology. *Proceedings of ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Washington, DC, 2003, pp. 305–308.

13. Popov I.A., Shchelchkov A.V., Zubkov N.N., Lei R.A, Gortyshov Yu.F. Boiling heat transfer of different liquids on microstructured surfaces. *Russian aeronautics*, 2014, vol. 57, no. 4, pp. 395–401. doi: 10.3103/S1068799814040138.

14. Yakomaskin A., Afanasiev V., Zubkov N., Morskoy D. Investigation of heat transfer in evaporator of microchannel loop heat pipe. *Journal of Heat Transfer*, 2013, vol. 135 (10), art. 101006. doi: 10.1115/1.4024502.

15. Solovyeva L., Zubkov N., Lisowsky B., Elmoursi A. Novel electrical joints using deformation machining technology. Part I: Computer Modeling. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, 2012, vol. 2 (10), pp. 1711–1717. doi: 10.1109/TCPMT.2012.2207723.

16. Solovyeva L., Zubkov N., Lisowsky B., Elmoursi A. Novel electrical joints using deformation machining technology. Part II: Experimental verification. *Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, 2012, vol. 2 (10), pp. 1718–1722. doi: 10.1109/TCPMT.2012.2199755.

17. Zubkov N.N., Sleptsov A.D. Influence of deformational cutting data on parameters of polymer slotted screen pipes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2016, vol. 138, no. 1, pp. 011007-1–011007-7. doi: 10.1115/1.4030827.

18. Klocke F. *Manufacturing processes.* 1. *Cutting.* Berlin, Springer, 2011. 504 p. ISBN 978-3-642-11978-1. doi: 10.1007/978-3-642-11979-8.

19. Chou S.K., Evans C.J. White layers and thermal modeling of hard turning surfaces. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1999, vol. 39, pp. 1863−1881.

20. Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoi obrabotki* [Technological processes of laser treatment]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006. 663 p. ISBN 978-5-7038-2701-7.

21. Mohamad A. Wear performance of a laser surface hardened ASTM 4118 Steel. *Engineering and Technology Journal*, 2013, vol. 31, no. 17, pp. 2335–2344.

22. Maslov A.R. *Rezanie metallov v sovremennom mashinostroenii* [Cutting of metals in modern mechanical engineering]. Moscow, ITO Publ., 2008. 299 p. ISBN 5-94275-049-1.

23. Chirkin V.S. *Teplofizicheskie svoistva materialov yadernoi tekhniki* [Thermophysical properties of nuclear engineering materials]. Moscow, Atomizdat Publ., 1968. 483 p.

24. Davim P. *Machining of hard materials.* London, Springer, 2011. 211 p. ISBN 978-1-84996-449-4. doi: 10.1007/978-1-84996-450-0.

25. Burakowski T., Wierzchon T. *Surface engineering of metals: principles, equipment, technologies.* Boca Raton, FL, CRC Press, 1998. 592 p. ISBN 9780849382253.

26. Altgilbers L. *Explosive pulsed power.* London, UK, Imperial College Press, 2011. 596 p. ISBN-10: 1848163223.

27. Majumdar J.D., Manna I. *Laser-assisted fabrication of materials.* Berlin, Springer, 2013. 485 p. ISBN 978-1848163225.

28. Vasilev S.G., Degtyareva A.G., Zoubkov N.N., Poptsov V.V., Simonov V.N. Otsenka tribotekhnicheskikh kharakteristik stali 40Kh posle zakalki deformiruyushchim rezaniem [Evaluation of tribotechnical characteristics of 40Kh steel after hardening by deformational cutting]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, no. 11. Available at: http://engjournal.ru/articles/1698/1698.pdf (accessed 14.05.2018). doi: 10.18698/2308-6033-2017-11-1698.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2018 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).