

Расчет и конструирование машин

УДК 621.9.04:621.787

Особенности деформационного упрочнения поверхностного слоя деталей методом деформирующего резания

Я.И. Шуляк

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Peculiarities of the strain hardening of surface layers of parts by deformational cutting

Y.I. Shulyak

Bauman Moscow State Technical University, Building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation



e-mail: yan.shulyak@yandex.ru

i Задача повышения износостойкости деталей машин обуславливает необходимость разработки и исследования новых методов поверхностного упрочнения, к которым относится метод деформирующего резания (ДР). Исследовано распределение микротвердости в формируемом при обработке ДР поверхностном слое, поскольку одним из факторов, влияющим на износостойкость поверхностей трения, является распределение микротвердости на поверхности трения. Исследование микротвердости проводилось на металлографических шлифах из стали 30ХГСА, изготовленных с помощью инструмента с различными комбинациями главного и вспомогательного углов в плане. Получены экспериментальные данные, характеризующие распределение микротвердости в поверхностном слое, формируемом при обработке методом ДР. Результаты эксперимента показали, что применение метода ДР для обработки ферритно-перлитной стали марки 30ХГСА в состоянии поставки позволяет повысить исходную микротвердость.

Ключевые слова: износостойкость, микротвердость, упрочнение, деформирующее резание.

i Improving the wear resistance of machine parts requires the development and study of new methods of surface hardening such as deformational cutting. One of the factors influencing the surface wear is the microhardness distribution on friction surfaces. This paper studies the microhardness distribution in a surface layer formed during deformational cutting. Tools with different combinations of plan approach and side cut angles were used to cut metallographic polished samples of 30HGSA steel needed for this study. Experimental data on the microhardness distribution in the surface layer formed by deformational cutting were obtained. The experimental results prove that the application of the deformational cutting technique for machining ferritic-pearlitic 30HGSA steel makes it possible to improve the initial microhardness.

Keywords: wear resistance, microhardness, hardening, deformational cutting.

Во многих областях машиностроения актуальна задача повышения износостойкости поверхностей трения деталей машин и механизмов. Для ее решения существует множество методов поверхностного упрочнения, которые основаны на изменении химического состава, повышении плотности дислокаций, явлениях структурных и фазовых превращений и их комбинаций. В зависимости от используемого механизма упрочнения варьируется трудоемкость и стоимость изготовления деталей машин и механизмов.

В машиностроении наиболее широко распространены методы поверхностного пластического деформирования (ППД), основанные на изменении дислокационной структуры в поверхностном слое обрабатываемой детали посредством его целенаправленного деформирования. При ППД механические характеристики материала (твердость, предел упругости, предел прочности) повышаются в зависимости от величины деформации, внесенной в материал. Этот же принцип упрочнения с внесением определенной степени деформации в поверхность обрабатываемой детали используется и в методе деформирующего резания (ДР). Основоположники данного способа механической обработки — Н.Н. Зубков и А.И. Овчинников — реализовали данный метод практически на кафедре «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Как и при ППД материал поверхностного слоя подвергается процессу пластического деформирования с целью увеличения его твердости. Идея применения метода ДР для повышения эксплуатационных свойств поверхностей трения изложена в патенте [1].

Суть метода ДР состоит в том, что при обработке на универсальном металлорежущем оборудовании по традиционным схемам точения, строгания или фрезерования используется режущий инструмент с особой формой заточки в результате чего на поверхности заготовки формируется регулярный макрорельеф заданной формы. Геометрические параметры инструмента подбираются так, что на инструменте формируется одна режущая кромка, разделяющая материал припуска на слой, и одна деформирующая кромка, которая вместо того, чтобы окончательно отделить подрезанный слой припуска и превратить в стружку, отгибает и деформирует подрезанный слой, придавая ему заданную форму (рис. 1). В результате чего подрезаемый слой материала заготовки движется по передней поверхности инструмента и пере-

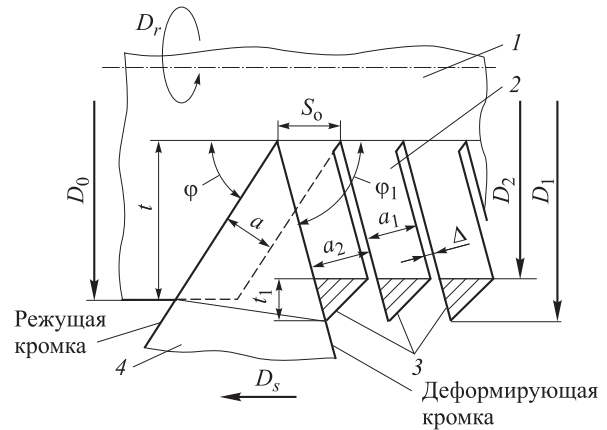


Рис. 1. Схема формирования макрорельефа на наружной поверхности вала:
1 — заготовка; 2 — ребро; 3 — удаляемые вершины ребер;
4 — инструмент ДР

гибается через деформирующую кромку, оставаясь прочно соединенным с поверхностью заготовки. Таким образом при ДР подрезаемый слой не сходит с заготовки в виде стружки как при традиционном точении и другой лезвийной обработке, а образует на наружной поверхности заготовки макрорельеф различной формы. В зависимости от параметров заточки инструмента и схемы механической обработки на поверхности заготовки может быть получен макрорельеф в форме ребер, шипов, ячеек. Особенности процесса обработки методом ДР подробно изучены и изложены в работе [2].

Метод ДР имеет ряд достоинств: простая конструкция режущего инструмента, использование стандартного металлорежущего оборудования, широкая гамма обрабатываемых материалов, высокая производительность обработки, множество вариантов получаемого макрорельефа заданной формы. Методом ДР можно обрабатывать стали с твердостью не более 220 НВ и относительным удлинением не менее 18 % [3]. В результате обработки методом ДР сформированный регулярный макрорельеф на поверхности заготовки подвергается пластическому деформированию и как следствие деформационному упрочнению.

Благодаря многообразию форм получаемого макрорельефа метод ДР имеет широкую область применения, включая изготовление деталей теплообменных аппаратов [4] и фильтрующих труб [5], восстановление изношенных поверхностей валов, осей [6] и др. В настоящее время разрабатывается методика использования ДР для повышения износостойкости поверхностей трения скольжения за счет эффекта деформационного упрочнения [7–9]. Данный способ упрочнения

предполагается использовать как для закаливаемых, так и незакаливаемых материалов. В случае обработки закаливаемых сталей возможно получение термически упрочненного поверхностного слоя высокой твердости за счет фазовых превращений [10, 11].

Цель работы — исследование влияния величины соотношений углов в плане режущего инструмента для ДР на повышение твердости материала формируемого микрорельефа.

Для повышения износостойкости пар трения скольжения целесообразно формирование регулярной макроструктуры в виде вертикальных ребер с зазорами или наклонных ребер без зазоров. Зазоры между ребрами служат для размещения смазки и отвода продуктов износа из зоны трения. Эффект повышения износостойкости кроме создания упрочненной макроструктуры возникает и за счет изменения условий смазывания пары трения. В случае формирования макроструктуры с наклонными ребрами без зазоров получаемая поверхность трения имеет ту же несущую способность, что и сплошная поверхность трения, а эффект повышения износостойкости предположительно достигается за счет повышения твердости в обработанном материале. Схема формирования микрорельефа с наклонными ребрами при обработке методом ДР цилиндрической заготовки диаметром D_0 по схеме точения представлена на рис. 1. При внедрении инструмента на глубину t он подрезает обозначенный пунктиром слой металла толщиной a , который, деформируясь, переходит в форму ребра, толщиной a_1 . Вследствие постоянства деформируемого объема площадь сечения подрезаемого слоя и площадь сечения формируемого ребра одинаковы. При этом соотношения геометрических параметров инструмента таковы, что диаметр обработанной заготовки D_1 , измеренный по вершинам ребер превышает исходный диаметр заготовки D_0 . Поскольку вершины ребер для образования поверхности трения удаляются, то при формировании наклонных ребер без зазоров окончательный диаметр заготовки D_2 меньше обрабатываемого диаметра D_0 . При формировании вертикальных ребер с зазором диаметр D_2 становится больше обрабатываемого диаметра D_0 , что позволяет использовать метод ДР для восстановления изношенных наружных поверхностей валов.

При формировании регулярной макроструктуры между деформирующей кромкой и предыдущим ребром образуется зазор шириной a_2 , в который проходит формируемое ребро

толщиной a_1 . Если $a_1 < a_2$, то между ребрами формируется зазор

$$\Delta = a_2 - a_1,$$

величина которого зависит от назначенной подачи S_0 и соотношения углов в плане φ и φ_1 . Покажем это математически.

Значение a_2 определяется вспомогательным углом в плане φ_1 и величиной подачи S_0 :

$$a_2 = S_0 \sin \varphi_1.$$

Толщина формируемого ребра a_1 определяется толщиной подрезаемого слоя a , умноженной на коэффициент утолщения ребра ξ [2]:

$$a_1 = a\xi.$$

Толщина подрезаемого слоя рассчитывается по известному выражению

$$a = S_0 \sin \varphi,$$

где φ — главный угол в плане.

Отсюда

$$\Delta = a_2 - a_1 = S_0 (\sin \varphi_1 - \xi \sin \varphi). \quad (1)$$

В работе [2] исследовалась величина коэффициента утолщения ребра ξ в зависимости от величины подачи S_0 и глубины внедрения инструмента t , согласно которым обычно коэффициент $\xi = 0,9 \dots 1,3$.

Если в выражении (1) принять коэффициент утолщения стружки равным 1 и выполнить преобразование этого выражения с помощью тригонометрических тождеств, то получим следующее выражение:

$$\Delta \approx 2S_0 \sin \frac{\varphi_1 - \varphi}{2} \cos \frac{\varphi_1 + \varphi}{2}. \quad (2)$$

Анализ этого выражения показывает, что на величину получаемого зазора Δ непосредственно влияет разность углов в плане $(\varphi_1 - \varphi)$ и сумма углов $(\varphi_1 + \varphi)$. Обозначим разность углов в плане $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi$. Сумму углов выразим через угол при вершине резца ε , связанный с углами φ и φ_1 соотношением

$$\varepsilon + \varphi + \varphi_1 = 180^\circ.$$

Тогда выражение (2) примет вид

$$\Delta \approx 2S_0 \sin \frac{\Delta\varphi}{2} \cos \frac{180^\circ - \varepsilon}{2}. \quad (3)$$

Из анализа выражения (3) следует, что менять величину зазора Δ можно, варьируя разностью углов $\Delta\varphi$ при постоянном угле при вершине ε и постоянной величине подачи S_0 . При положительной разности $\Delta\varphi$ зазор $\Delta > 0$.

Очевидно, что для получения макроструктуры с ребрами без зазоров необходимо чтобы $\Delta\varphi \leq 0$.

В случае, если $\Delta\varphi < 0$, толщина формируемого ребра a_1 не может превышать зазор a_2 , следовательно, чтобы формируемое ребро могло пройти через него оно должно получить дополнительную деформацию, что способствует повышению его твердости. Отсюда следует предположение, что использование режущего инструмента с большей по модулю отрицательной величиной $\Delta\varphi$ будет способствовать большему упрочнению обрабатываемого материала. Для проверки данного предположения и оценки влияния разности углов $\Delta\varphi$ на упрочнение материала подрезаемого слоя была проведена серия экспериментов, часть которых описана в статье журнала № 11, 2011 г. Были получены данные о повышении микротвердости на сталях марок 30ХГСА и 38Х2МЮА при обработке методом ДР, установлен ряд закономерностей распределения микротвердости по сечению ребра. Определено, что в прирезцовой зоне ребра наблюдается повышенная микротвердость по сравнению со средней частью ребра. Приведенные автором в статье журнала № 11, 2011 г. экспериментальные данные хорошо отражают характер распределения микротвердости по высоте ребра, но не отражают в полной мере распределение по ширине ребра. Между тем известно, что максимальной износостойкостью обладает поверхность не с одинаковой высокой твердостью по всей своей площади, а поверхность с периодически чередующимися твердыми и мягкими участками. Поэтому распределение микротвердости по ширине ребра может служить важной характеристикой формируемой поверхности трения.

Приведенные рассуждения о влиянии $\Delta\varphi$ на геометрию и твердость получаемых макроструктур и отсутствие экспериментальных данных в ранних работах по распределению микротвердости по ширине формируемых ребер обусловило необходимость исследования данной задачи. Исследования проводились на трех металлографических шлифах из стали марки 30ХГСА в состоянии поставки. Образцы были изготовлены в одинаковых условиях на токарно-винторезном станке модели 16К20 с использованием инструмента с режущей частью из твердого сплава марки Т14К8. Были назначены следующие режимы обработки: глубина внедрения инструмента $t = 0,75$ мм, продольная подача $S_o = 0,4$ мм/об, скорость резания $V = 1,26$ м/с. При заточке инструмента для ДР в соответствии с табл. 1 варьировалась разность

углов в плане при постоянном значении других геометрических параметров инструмента, выбранных по рекомендациям работы [12] для обработки сталей.

После обработки заготовки методом ДР вырезались участки с макро рельефом для изготовления металлографических шлифов. Исследуемая плоскость металлографического шлифа соответствует осевому сечению заготовки, в котором наблюдается поперечный профиль формируемой макроструктуры. Вырезка осуществлялась на электроэрозионном вырезном станке.

Обозначения зон ребра, принятые для экспериментальных исследований, приведены на рис. 2. Слой материала у стороны ребра, непосредственно контактирующей с передней поверхностью инструмента ДР, назовем прирезцовой зоной, зону у поверхности ребра, не контактирующей с передней поверхностью, — тыльной зоной. Основанием ребра является зона ребра, которая непосредственно переходит в основной материал заготовки, вершиной ребра — треугольное заострение, находящееся выше обозначенной на рис. 2 линии чистой обработки. В большинстве случаев вершина ребра удаляется на окончательных этапах обработки точением или шлифованием. В эксплуатации участвует зона ребра, расположенная под линией чистой обработки. Обозначим эту зону как подвершинную зону ребра, а зону ребра, распо-

Таблица 1

Варьируемые геометрические параметры режущей части инструмента

Номер образца	φ , град	φ_1 , град	$\Delta\varphi$, град
1	62	66	4
2	65	63	-2
3	68	60	-8

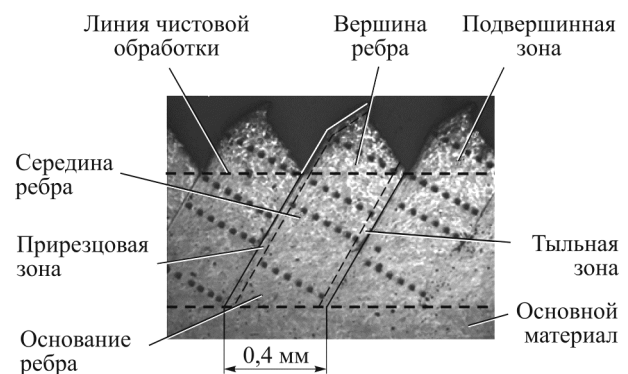


Рис. 2. Расположение исследуемых зон. Шлиф образца № 3

ложенную примерно на равном расстоянии от основания и вершины, — серединой ребра.

Исследуемые макроструктуры имеют некоторые особенности (рис. 3). Поскольку параметр $\Delta\phi$ при обработке образца № 1 положителен, то формируется макроструктура с зазорами (рис. 3, а). Вследствие искажения профиля ребра зазоры смыкаются у основания макроструктуры и дополнительной деформации материал не получает. Несмотря на то, что образец № 2 изготовлен инструментом с разностью углов $\Delta\phi = -2^\circ$, макроструктура имеет зазоры между ребрами из-за искажения профиля ребра. На макроструктуре у образца № 3 (рис. 3, в) из-за искажения профиля ребра вблизи вершин имеется зазор. Однако у основания ребра зазор уменьшается настолько, что становится сложно различить границу между двумя соседними ребрами. На макроструктуре образцов № 2 и 3 имеются незначительные вырывы материала в тыльной зоне ребра, причем вырывы на образце № 3 существенно меньше, чем на образце № 2.

Микротвердость измерялась методом восстановленного отпечатка четырехгранной пирамиды Виккерса на микротвердомере модели ПМТ-3М, оснащенный цифровой видеокамерой Levenhuk c510 для облегчения процесса измерения. Нагрузка для измерения микротвердости была выбрана равной 0,981 Н, что соответствует грузу массой 100 г, устанавливаемому на шток нагружающего устройства микротвердомера.

Отпечатки пирамиды Виккерса ставились в направлении, перпендикулярном прирезцовой зоне ребра с шагом 50 мкм. На каждом измеряемом профиле ребра отпечатки образовывали четыре дорожки измерения соответственно на вершине ребра, под линией шлифования, в се-

редине ребра и в основании ребра. Измерения проводились на шести ребрах каждого образца. При этом, если на одном ребре первые в соответствующем ряду отпечатки фиксировались на расстоянии 25 мкм от края, то на следующем ребре первые отпечатки размещались на расстоянии 50 мкм от края ребра. Благодаря такой последовательности измерений можно построить график изменения микротвердости с шагом между точками измерения меньшим, чем минимальное допустимое расстояние между соседними отпечатками. В данном случае шаг между значениями на графике распределения микротвердости составил 25 мкм. Кроме диагоналей отпечатка измерялось расстояние от прирезцового края ребра до центра отпечатка.

Результаты измерения представлены на рис. 4. По оси абсцисс на рисунке откладывалось измеренное расстояние от прирезцовой стороны ребра до точки измерения микротвердости, а по оси ординат — значения микротвердости. Совокупность точек для каждой области аппроксимировалась функцией полинома 4-й степени, полученным методом наименьших квадратов. Аппроксимирующие функции задают кривые распределения, позволяющие наглядно оценить различие уровней микротвердости в исследуемых зонах ребра. Значения по оси ординат полученных кривых отсчитываются от значения исходной микротвердости материала, равной 240 HV_{0,1}.

Большая часть значений микротвердости на всех исследуемых образцах лежит в диапазоне 280–320 HV_{0,1}. Данный диапазон в целом характеризует величину упрочнения материала ребра, гарантированно получаемую на стали 30ХГСА при приведенных режимах обработки. Для более подробного сравнения твердости макроструктур рассматриваются кривые рас-

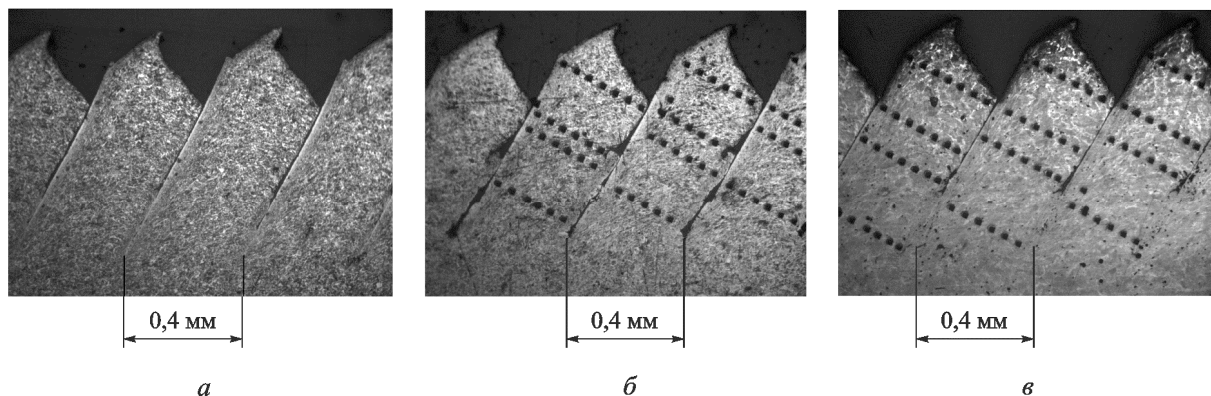


Рис. 3. Макроструктура образцов (материал сталь 30ХГСА, режимы обработки: $t = 0,75$ мм; $S_0 = 0,4$ мм/об; $V = 1,26$ м/с):

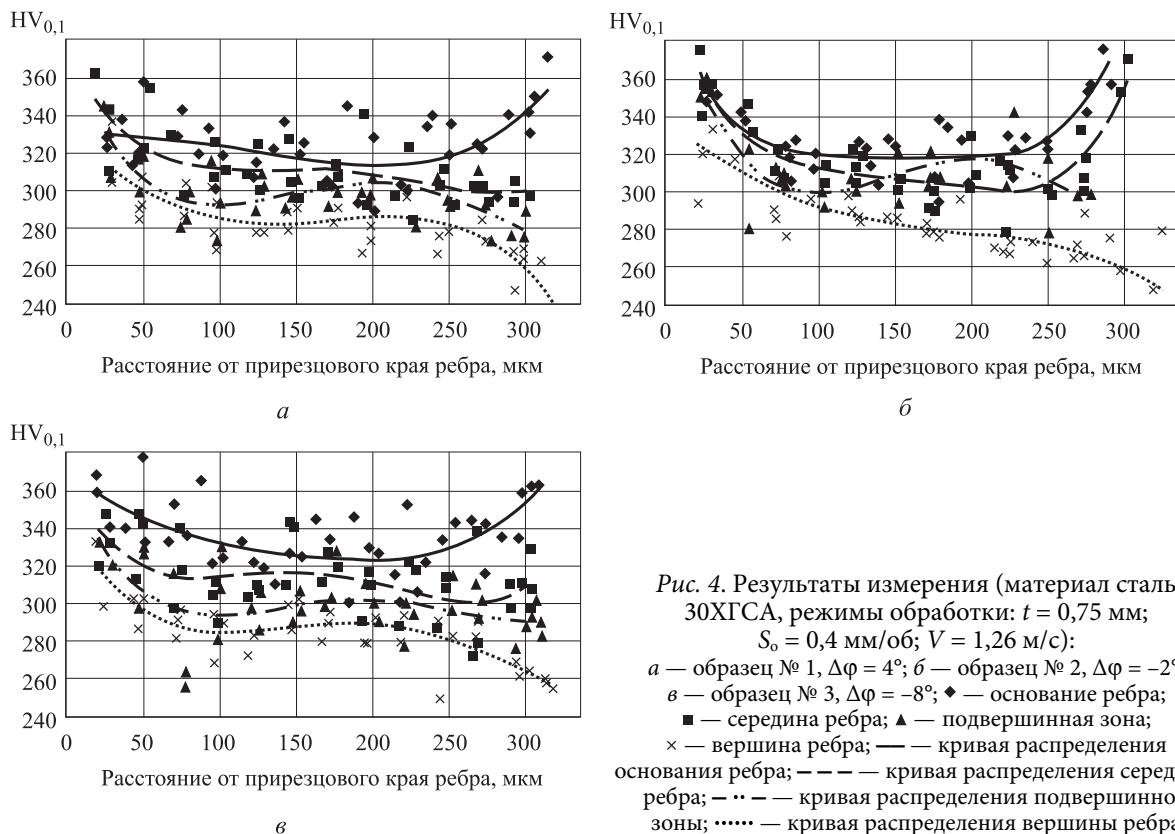
а — образец № 1, $\Delta\phi = 4^\circ$; б — образец № 2, $\Delta\phi = -2^\circ$; в — образец № 3, $\Delta\phi = -8^\circ$

предела. Например, на расстоянии от прирезковой стороны ребра, равном 150 мкм, кривая распределения для вершины ребра образца № 3 приближается к отметке 290 HV_{0,1}, а соответствующие кривые распределения образцов № 1 и 2 в этой точке проходят через отметку 280 HV_{0,1}. Кривая распределения для основания ребра образца № 3 на расстоянии 150 мкм от прирезковой стороны ребра расположена выше значений 320 HV_{0,1}, приближаясь к отметке 330 HV_{0,1}, а соответствующие кривые образца № 1 и 2 лежат ниже значения 320 HV_{0,1}. Данный факт свидетельствует о том, что применение режущего инструмента с разностью углов в плане инструмента $\Delta\varphi = -8^\circ$ незначительно повышает микротвердость формируемого ребра. Предположительно режущий инструмент с еще большей по модулю отрицательной разностью углов $\Delta\varphi$ обеспечит еще большее повышение микротвердости. Такая тенденция изменения рассматриваемых углов φ и φ_1 может негативно сказаться на надежности работы инструмента, так как будет сопровождаться увеличением нагрузки на режущий клин.

На всех образцах в узкой прирезковой зоне ребра шириной, равной 25...50 мкм, наблюдаются повышенные значения микротвердости — 290–380 HV_{0,1}. Минимальные значения диапа-

зона соответствуют вершине ребра, а максимальные — основанию ребра. Повышение микротвердости в прирезковой зоне ребра объясняется дополнительным деформационным воздействием на материал подрезаемого слоя сил трения и нормальной нагрузки со стороны передней поверхности и вспомогательной задней поверхности инструмента. Можно утверждать, что деформирующая кромка ребра выглаживает поверхность у прирезковой зоны ребра, тем самым способствуя дополнительной деформации материала. Отсюда следует, что при условии снижения подачи до значений ~0,05...0,075 мм/об и условии неизменности толщины прирезковой зоны, равной 25...50 мкм, можно добиться формирования макроструктуры, в которой прирезковая зона будет распространяться практически на всю ширину ребра. Для вершины ребра, подвершинной зоны и середины ребра наблюдается снижение микротвердости материала за пределами прирезковой зоны ребра.

На каждом из рассмотренных образцов значительно отличается распределение микротвердости для основания ребра, что объясняется особенностью расположения отпечатков в основании ребра. Отпечатки тыльной зоны у основания ребра располагаются в области с дополнительной деформацией, обусловленной



поворотом ребра, поэтому соответствующие им значения микротвердости сопоставимы или превышают значения микротвердости отпечатков в прирезцовой зоне.

Выводы

1. Применение метода ДР для обработки ферритно-перлитной стали марки 30ХГСА в состоянии поставки позволяет повысить исходную микротвердость от 240 HV_{0,1} до 320–380 HV_{0,1}.

2. Использование инструмента с разностью углов в плане, равной $\Delta\varphi = -8^\circ$, позволяют достигнуть максимального упрочнения за счет

возникновения дополнительной деформации в материале формируемого ребра.

3. Сила трения и нормального давления между режущим инструментом и подрезаемым слоем способствует повышению микротвердости в прирезцовой зоне ребра до значений 380 HV_{0,1} и неравномерному распределению микротвердости по ширине ребра.

4. Для получения макроструктуры с максимальным упрочнением по всей ширине необходимо понижение подачи S_0 до значений 0,05...0,075 мм/об, поскольку это обуславливает формирование ребра с шириной, сопоставимой с шириной прирезцовой зоны, имеющей максимальную микротвердость.

Литература

- [1] Зубков Н.Н., Овчинников А.И. *Способ получения поверхностей с чередующимися выступами и впадинами и инструмент для его реализации*. Пат. РФ 2044606, 1994, бюл. № 27.
- [2] Зубков Н.Н. *Разработка и исследование метода деформирующего резания как способа формообразования развитых макро рельефов*. Дисс. ... д-ра техн. наук. Москва, 2001. 478 с.
- [3] Зубков Н.Н., Васильев С.Г. Повышение износостойкости деталей пар трения скольжения на основе метода деформирующего резания. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2013, № 8, с. 3–9.
- [4] Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Каськов С.И. Микроканальный щелевой теплообменник. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, № 2(26). URL: <http://engjournal.ru/articles/1202/1202.pdf> (дата обращения 4 декабря 2014).
- [5] Зубков Н.Н., Слепцов А.Д. Получение полимерных щелевых фильтрующих труб методом деформирующего резания. *Вестник машиностроения*, 2010, № 12, с. 51–53.
- [6] Зубков Н.Н., Богомолов А.М., Васильев С.Г. Восстановление размеров и свойств поверхности изношенных деталей. *Практика противокоррозионной защиты*, 2001, № 4, с. 17–22.
- [7] Зубков Н.Н., Васильев С.Г., Попцов В.В., Шуляк Я.И. Модернизация машины трения типа «Amsler». *Трение и смазка в машинах и механизмах*, 2014, № 9, с. 33–37.
- [8] Зубков Н.Н. Ремонт, восстановление и модернизация на основе метода деформирующего резания. *Ремонт, восстановление, модернизация*, 2003, № 10, с. 7–11.
- [9] Зубков Н.Н. Совмещение процессов резания и обработки давлением в новом методе формообразования развитых поверхностных структур. *Кузнечно-штамповое производство. Обработка материалов давлением*, 2002, № 10, с. 17–20, 29–34.
- [10] Варламова С.Б., Дегтярева А.Г., Попцов В.В. Влияние термической обработки на структуру и микротвердость стали 35 после обработки методом деформирующего резания. *Молодежный научно-технический вестник*, 2013, № 9, с. 4. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/618567.html> (дата обращения 5 декабря 2014).
- [11] Дегтярева А.Г., Попцов В.В., Симонов В.Н., Васильев С.Г., Варламова С.Б. Формирование закаленных структур в стали 35 методом деформирующего резания. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 9, с. 30–44. URL: <http://technomag.bmstu.ru/en/doc/725672.html> (дата обращения 1 декабря 2014).
- [12] Васильев С.Г. *Разработка метода деформирующего резания для создания упрочняющих композиционных покрытий*. Дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 1996. 223 с.

References

- [1] Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I. *Sposob polucheniia poverkhnostei s chereduiushchimisia vystupami i vpadinami i instrument dlia ego realizatsii* [A method for producing surfaces

- with alternating ridges and depressions and a tool for its realization]. Patent RF no. 2044606, 1994.
- [2] Zubkov N.N. *Razrabotka i issledovanie metoda deformiruiushchego rezaniia kak sposoba formoobrazovaniia razvitykh makrorel'efov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Development and research method of deforming cutting as a way of shaping developed macrorelief. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 2001. 478 p.
- [3] Zubkov N.N., Vasil'ev S.G. Povyshenie iznosostoikosti detalei par treniia skol'zheniia na osnove metoda deformiruiushchego rezaniia [Wear resistance improvement based on deformational cutting]. *Uprochniaiushchie tekhnologii i pokrytiia* [Reinforcement technology and coatings]. 2013, no. 8, pp. 3–9.
- [4] Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I., Kas'kov S.I. Mikrokanal'nyi shchelevoi teploobmennik [Microchannel heat exchanger]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovations]. 2014, no. 2(26). Available at: <http://engjournal.ru/articles/1202/1202.pdf> (accessed 04 December 2014).
- [5] Zubkov N.N., Sleptsov A.D. Production of slotted polymer filter tubes by deformational cutting. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 12, pp. 1231–1233.
- [6] Zubkov N.N., Bogomolov A.M., Vasil'ev S.G. Vosstanovlenie razmerov i svoystv poverkhnosti iznoshennykh detalei [Renewal of sizes and properties of surface of worn out machine parts]. *Praktika protivokorroziionnoi zashchity* [Practice Corrosion protection]. 2001, no. 4, pp. 17–22.
- [7] Zubkov N.N., Vasil'ev S.G., Poptsov V.V., Shuliak Ia.I. Modernizatsiia mashiny treniia tipa «Amsler» [Modernization of the car of friction like «Amsler»]. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmaxh* [Friction and lubrication in machinery]. 2014, no. 9, pp. 33–37.
- [8] Zubkov N.N. Remont, vosstanovlenie i modernizatsiia na osnove metoda deformiruiushchego rezaniia [Practice of repair, reconditioning, and modernization]. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiia* [Repair, Reconditioning, Modernization]. 2003, № 10, pp. 7–11.
- [9] Zubkov N.N. Sovmeshchenie protsessov rezaniia i obrabotki davleniem v novom metode formoobrazovaniia razvitykh poverkhnostnykh struktur [Combining cutting processes and forming a new method of forming the developed surface structures]. *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and stamping production. Materials processing pressure]. 2002, no. 10, pp. 17–20, 29–34.
- [10] Varlamova S.B., Degtiareva A.G., Poptsov V.V. Vliianie termicheskoi obrabotki na strukturu i mikrotverdost' stali 35 posle obrabotki metodom deformiruiushchego rezaniia [Effect of heat treatment on the structure and microhardness of steel 35 after processing by deforming cutting]. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik* [Youth Science and Technology Gazette]. 2013, no. 9, 4 p. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/618567.html> (accessed 5 December 2014).
- [11] Degtiareva A.G., Poptsov V.V., Simonov V.N., Vasil'ev S.G., Varlamova S.B. Formirovanie zakalennykh struktur v stali 35 metodom deformiruiushchego rezaniia [Formation of quenching structures in the steel 35 by deform cutting]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU]. 2014, no. 9, pp. 30–44. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/en/doc/725672.html> (accessed 1 December 2014).
- [12] Vasil'ev S.G. *Razrabotka metoda deformiruiushchego rezaniia dlia sozdaniia uprochniaiushchikh kompozitsionnykh pokrytii*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of a method for creating deforming cutting reinforcing composite coatings. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman Press, 1996. 223 p.

Статья поступила в редакцию 23.01.2015

Информация об авторе

ШУЛЯК Ян Игоревич (Москва) — ассистент кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: yan.shulyak@yandex.ru).

Information about the author

SHULYAK Yan Igorevich (Moscow) — Assistant of «Tool Engineering and Technologies» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, Building 1, 2-nd Bauman-skaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: yan.shulyak@yandex.ru).