

# ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТ

для профессионалов

В НОМЕРЕ:

**GALIKA:** путь новинкам высоких технологий в Украину открыт!

**Гидравлика SAUER-DANFOSS:** необычайная широта выбора

**Литье под давлением:** достижения и перспективы

**Блестящее решение SODICK**

**Самосмазывающиеся подшипники скольжения**

**Прочные, жесткие, коррозионно-стойкие соединения клеем Loxal**



Н. Н. ЗУБКОВ, д.т.н.;  
С. Г. ВАСИЛЬЕВ, к.т.н.;  
А. И. ОВЧИННИКОВ, к.т.н.,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

# Методы восстановления размеров и свойств поверхности изношенных деталей

(окончание, начало см. №6/2004)

## Methods of Wearing Parts Restoration

(continued from issue 6, 2004)

The method of deforming cutting (DC) is based on the combination of cutting and plastic deformation – the surface layer of metal is trimmed and bent over forming surface microrelief of ribs and grooves. The process is carried out with the help of special cutter equipped with an additional edge unable of cutting. This method can be used independently for enlargement (restoration) of parts sizes, however its implementation is limited to low hardness parts – mostly large-sized shafts. The upper limit of diameter enlargement is about 0.8 mm.

The resulting narrow grooves can have both negative and positive effect on the operational parameters of the part – as on the one hand they lessen the area of the bearing surface, and on the other hand they can serve for lubrication retention and wearing wastes collection. However, if the ribbed surface is unacceptable for operational conditions it can be removed in several ways – by means of filling the grooves with solid lubricant; by means of enamelling; by plastic deformation of rib tops; by spark alloying; by band soldering, etc.

Besides, the DC method can be effectively employed in combination with various method of coating application for wearing parts restoration, as coatings applied to ribbed surface have higher adhesion stability. The anchorage effect of the DC relief can also be used when preparing parts for subsequent glueing, which is particularly important for materials with low adhesive ability.

### ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ДЕФОРМИРУЮЩЕГО РЕЗАНИЯ (ДР)

В №12/2003 и №4/2004 нашего журнала мы уже описывали технологию деформирующего резания (ДР) и ее возможности. В основном приводились примеры получения высокоэффективных поверхностей теплообмена. Теперь в контексте проблемы настоящей статьи рассмотрим, что способна предложить технология ДР для восстановле-

ния характеристик поверхности и размеров изношенных деталей машин.

Напомним, что метод деформирующего резания основан на подрезании и отгибке поверхностных слоев металла с образованием макрорельефа в виде ребер и канавок. Основой процесса является совмещение обработки резанием и пластического деформирования.

Метод ДР реализуется инструментом типа резца на стандартном металлорежущем оборудовании. Основное отличие резца для деформирующего резания состоит в том, что он имеет вспомогательную кромку, на которой исключен процесс резания. При работе таким инструментом происходит разрушение материала по линии проекции главной режущей кромки, а по линии проекции вспомогательной

кромки разрушения не происходит. Сечение подрезанного слоя сохраняет механическую связь с обрабатываемой заготовкой, что и позволяет направленно деформировать подрезанный слой с образованием ребер заданной формы и размеров. Соответственно, стружка в процессе обработки не образуется, а линейные размеры детали увеличиваются.

Метод деформирующего резания может быть использован при восстановлении размеров деталей как самостоятельный технологический прием. В этом случае увеличение диаметральных или линейных размеров восстанавливаемых деталей заключается в перераспределении материала поверхностного слоя за счет создания открытой регулярной пористости в виде канавок в поверхностном слое

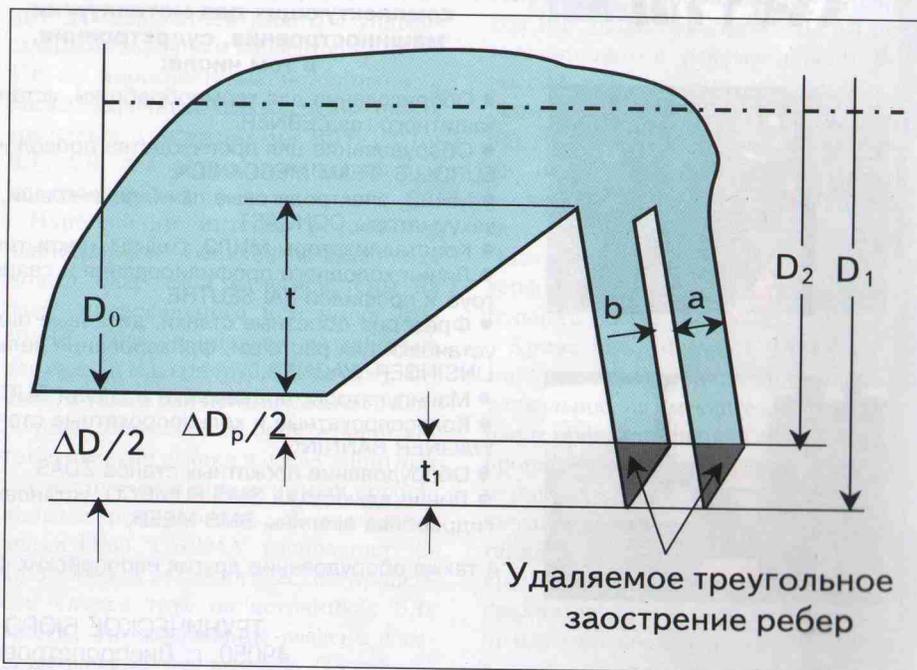


Рис. 1. Принцип увеличения размеров при обработке деформирующим резанием.



детали (рис.1). Для увеличения опорной поверхности восстановленной детали треугольное заострение вершин ребер размером ( $t_1$ ) после ДР удаляется.

Разработана методика расчета геометрических параметров инструмента для ДР и режимов обработки для заданного увеличения линейных размеров восстанавливаемых деталей. Для сталей ширина канавок ( $b$ ) может составлять от 30 мкм до 0,5 мм. Шаг оребрения – от 0,15 до 1,5 мм.

Например, сами разработчики технологии для целей восстановления обычно используют вертикальные ребра при ширине канавки, в 3 раза меньшей, чем величина шага. Типичный профиль оребрения на сталях показан на рис. 2. Канавки могут быть наклонными. Смазочные жидкости при обработке не применяются. Для материалов с относительным удлинением в диапазоне 20...30 %, к которым относятся большинство сталей, высота вертикальных ребер составляет около 3 шагов оребрения, но не более 2 мм.

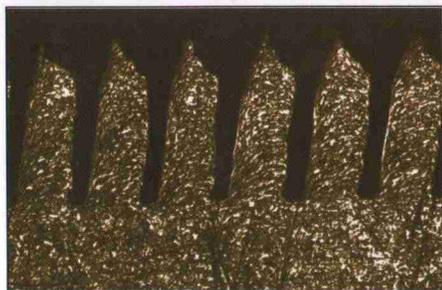


Рис. 2. Типичный профиль оребрения, получаемого методом ДР на сталях.

Детали из материалов, имеющих относительное удлинение менее 18%, для обработки ДР необходимо предварительно дополнительно подогревать – либо целиком, либо ограничиваясь зонной обработкой.

### ПРИМЕНИМОСТЬ МЕТОДА ДР

Фактором, существенно ограничивающим область использования деформирующего резания для восстановления исходных размеров, является ограничение по твердости обрабатываемых деталей. Метод ДР надежно реализуется при твердости заготовки не более НВ 220, т. е. только для незакаленных деталей.

Крупногабаритные детали (например, валы) в большинстве случаев не подвергаются объемному или поверхностному упрочнению. Поэтому метод ДР считается перспективным именно для целей восстановления крупногабаритных деталей, в первую очередь валов. Предель-

**Метод деформирующего резания может быть использован при восстановлении размеров деталей как самостоятельный технологический прием. В этом случае увеличение диаметральных или линейных размеров восстанавливаемых деталей заключается в перераспределении материала поверхностного слоя за счет создания открытой регулярной пористости в виде канавок в поверхностном слое детали.**

ным для возможностей деформирующего резания является увеличение диаметра на 0,8 мм.

Производительность и затраты на инструмент, а также на сам процесс обработки практически не отличаются от черного точения. Например, время увеличения диаметра со 189,3 до 190 мм с длиной изношенного участка 200 мм составляет около 3 минут.

Понятно, что получающаяся на поверхности восстановленной детали пористость в виде узких щелей, в большинстве случаев, является негативным явлением, т.к. уменьшает площадь несущей поверхности детали. Наличие вертикальных ребер снижает несущую поверхность на 30%. Однако материал ребер, образованных в процессе ДР, имеет значительную нагартовку – его твердость и прочность в 1,3...1,7 раза превышают характеристики исходного материала, что компенсирует снижение площади несущей поверхности. Напомним, кстати, что при увеличении размеров путем накатки рифлений роликами несущая поверхность снижается на 50%.

Остаточная регулярная пористость в виде узких щелей может служить и положительным фактором, например, для удержания и подвода смазки, а также для сбора продуктов износа, например, в узлах трения скольжения. Узкие канавки, обладающие капиллярным эффектом, удерживают значительное количество жидкой или консистентной смазки, при этом она равномерно распределена по всей поверхности трения.

### О ПРИМЕНЕНИИ ДР ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ В СОЕДИНЕНИЯХ С НАТЯГОМ

Разработчиками технологии были проведены испытания стальных валов, восстановленных методом деформирующего резания, на усилие запрессовки – выпрессовки. По сравнению с гладким (новым) валом, эти усилия значительно больше, что повышает надеж-

ность соединения с натягом. Наибольший эффект увеличения силы запрессовки – выпрессовки восстановленных (оребранных) валов достигается при малых значениях номинального натяга (при 11 мкм – в 2,0...2,3 раза). При натягах 30...40 мкм сила запрессовки увеличивается в 1,2...1,4 раза по сравнению с гладким валом.

Заметим: резкое увеличение сил запрессовки – выпрессовки при применении оребранных деталей в соединениях с натягом

имеет место, несмотря на существенное снижение опорной поверхности вала. Это объясняется тем, что при приложении осевого усилия к ребру оно может упруго изгибаться, при этом диаметр по вершинам ребер увеличивается. Соответственно увеличивается натяг и осевая сила.

Разработчиками технологии ДР предложен вариант восстановления посадочных размеров валов или втулок, при котором можно заранее обеспечить различие в величинах усилий запрессовки и выпрессовки (т.е. когда способность вала или втулки воспринимать осевые нагрузки намного превышает усилие их сборки). Этого можно достичь формированием на восстанавливаемой поверхности наклонных ребер, как показано на рис.3, что достаточно просто реализовать методом ДР.

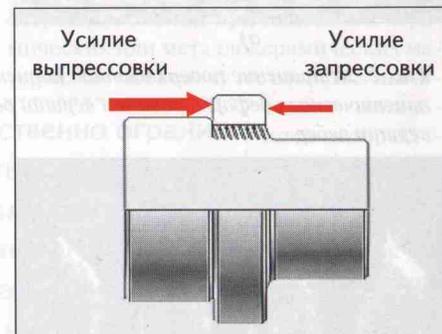
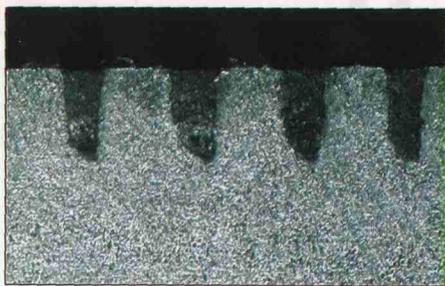


Рис. 3. Восстановление посадочных размеров валов или втулок при обеспечении неодинаковости усилий запрессовки и выпрессовки.

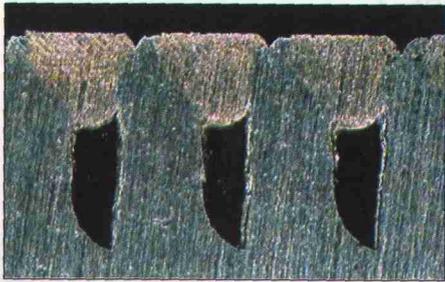
Наклонные ребра за счет упругих деформаций позволяют при малых осевых усилиях произвести сборку соединения с натягом, поскольку за счет упругой деформации ребер в процессе запрессовки натяг в соединении будет уменьшаться. При выпрессовке вала или втулки упругий изгиб ребер будет увеличивать натяг в соединении, существенно увеличивая усилие выпрессовки, т.е. сопряжение будет способно воспринимать осевые усилия, значительно превосходящие усилия при сборке деталей.



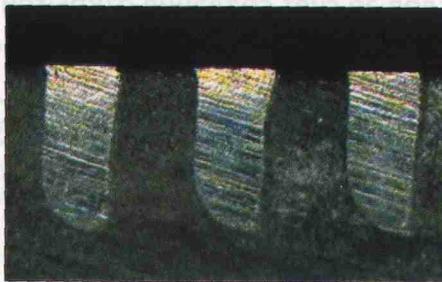
а)



б)

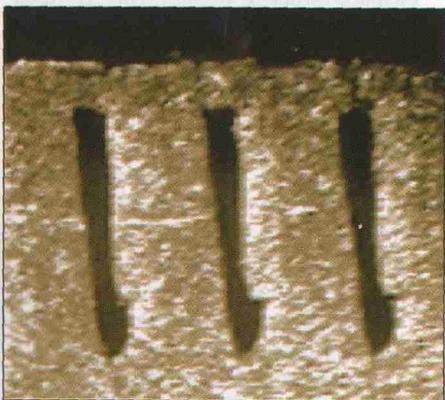


в)



г)

Рис. 4. Твердые смазки в структуре восстановленной поверхности:  
а – дисульфид молибдена, б – серебро, в – медь (запрессованная проволока), г – медь.

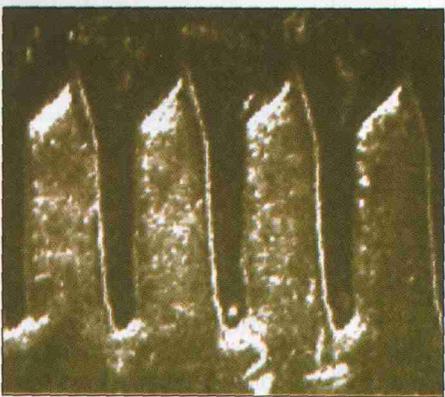


а)

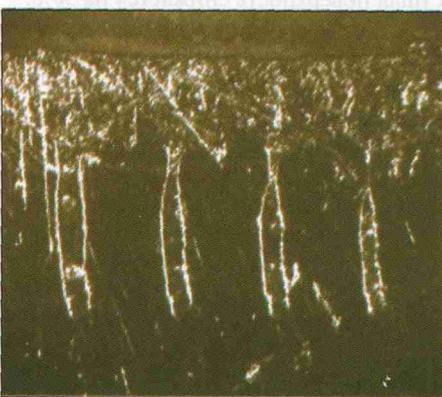


б)

Рис. 5. Устранение поверхностной пористости детали, восстановленной ДР путем пластического деформирования вершин ребер (а) и электроискрового легирования (б) вершин ребер.



а)



б)

Рис. 6. Использование макрорельефа, получаемого ДР для приварки ленты:  
а – поверхность вала до приварки ленты, б – после приварки.

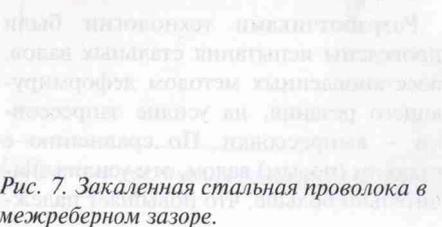


Рис. 7. Закаленная стальная проволока в межреберном зазоре.

### СПОСОБЫ ПОДАВЛЕНИЯ НЕЖЕЛАТЕЛЬНОЙ ПОРИСТОСТИ ПОСЛЕ ВЫПОЛНЕНИЯ ДР

Если поверхностная пористость недопустима по условиям эксплуатации восстановленной детали, то ее можно удалить следующими способами: – заполнением межреберного зазора металлическими, неорганическими или полимерными твердыми смазками (медь, олово, серебро, дисульфид молибдена, графит, фторопласт и др.) (рис. 4);

– заполнением межреберных зазоров восстановленной детали методом эмалирования, которое можно проводить в обычных термических печах с окислительной атмосферой; положительный результат был достигнут при эмалировании оребренных поверхностей деталей из низкоуглеродистых сталей при нанесении эмали ЭВТ-10; восстановленная поверхность после шлифования представляет собой чередование слоев керамики с металлическими прослойками;

– пластическим деформированием вершин ребер; возможна развальцовка вершин ребер твердосплавным выглаживателем и свободно вращающимся роликом; в обоих случаях поверхностная пористость может быть уменьшена или устранена полностью (рис. 5а);

– электроискровым легированием: диаметр вала, показанного на рис. 5б, был восстановлен на 0,4 мм, при этом электроискровое легирование не только полностью устранило поверхностную пористость, но и обеспечило повышенные износостойкости поверхности за счет ее насыщения легирующими элементами;

– электроконтактной наваркой ленты; на рис. 6б представлен участок вала, размер которого восстановлен наваркой ленты на поверхность, обработанную методом ДР (рис. 6а); уменьшение теплоотвода (т. е. более высокие температуры в зоне контакта), увеличение контактных давлений между материалом детали и привариваемой ленты, увеличение плотности тока в контакте за счет заостренных вершин ребер обеспечивают гарантированное сплавление вершин ребер с материалом ленты и позволяют снизить сварочные токи;

– заполнением межреберного зазора закаленной проволокой с ее завальцовкой в межреберном пространстве (рис. 7); в сущности, это поверхностная закалка без нагрева – такое заполнение можно проводить непосредственно в процессе обработки ДР; для материалов, термоупрочнение которых невозможно (коррозионностойкие аустенит-



ные стали, большинство цветных металлов и сплавов), или деталей, термообработка которых затруднена (большие габариты), введение в межреберный зазор закаленной стальной проволоки позволяет значительно повысить твердость поверхности непосредственно на токарном станке без всякой термической обработки (например, проволоки из пружинной стали 65Г, 50ХФА или аналогичных марок, которая имеет твердость до 61 HRC и, соответственно, обладает повышенной износостойкостью);

– заполнением межреберного зазора металло- или керамиконаполненными ремонтными составами (рис.8) – этот вариант представляется наиболее простым и технологичным, поскольку не требует сложного оборудования и будет более подробно рассмотрен ниже;

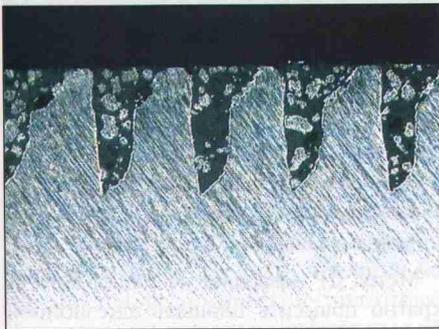


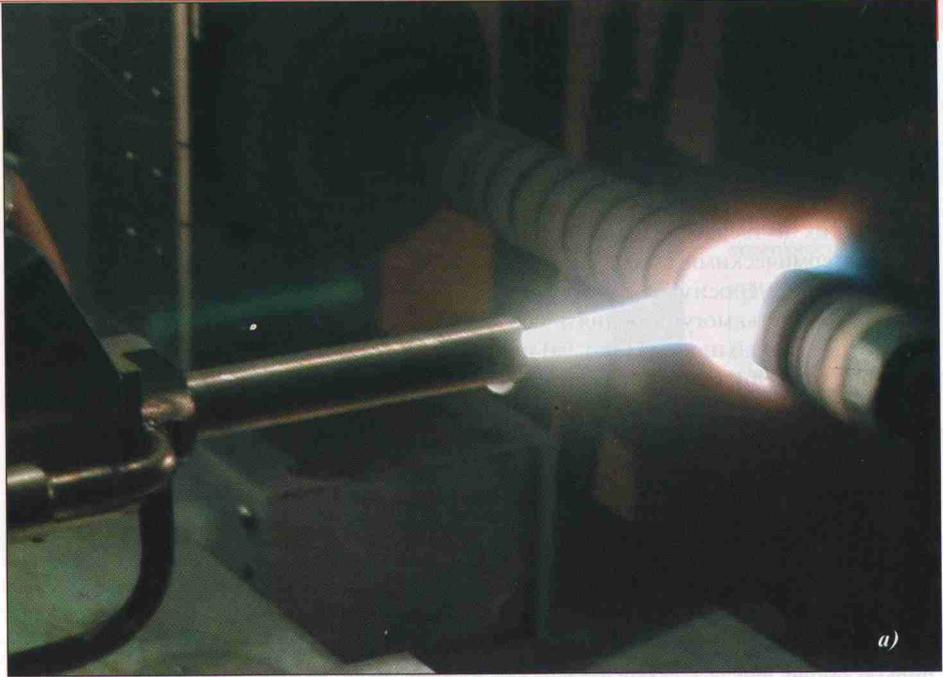
Рис. 8. Восстановление размеров комбинацией метода ДР и использованием ремонтных составов. Материал детали – сталь 40Х, межреберный зазор заполнен металлонаполненным ремонтным составом.

– заполнением межреберного зазора методами газопламенного напыления – такое заполнение можно проводить материалами с твердостью или прочностью, превосходящими характеристики восстановленной детали, при этом восстановленный поверхностный слой будет представлять собой композиционную структуру с вертикальным расположением упрочняющих слоев; на наш взгляд, этот вариант также является перспективным, поскольку может существенно повысить характеристики восстановленной детали по сравнению с исходной.



а)

Рис. 9. Полное (а) и частичное (б) заполнение межреберного зазора при газотермическом напылении керамических покрытий на поверхность, подготовленную методом ДР.



а)



б)

Рис. 10. Напыление твердого сплава методом сверхзвукового газопламенного напыления на детали, подготовленные методом ДР (а) и структура восстановленной поверхности (б).

### ПРИМЕНЕНИЕ ДР В КОМБИНАЦИИ С РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ

Как указывалось в первой части статьи (см. №6/2004 г.), нанесение покрытий является наиболее распространенным в промышленности методом восстановления размеров и свойств изношенных деталей машин и ме-

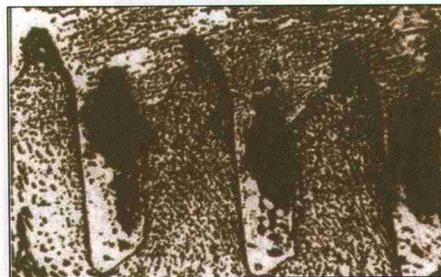
ханизмов. Низкая прочность связи покрытия с основой является наиболее острой проблемой при нанесении керамических или металлокерамических материалов, поскольку их свойства значи-

**Фактором, существенно ограничивающим область использования ДР для восстановления исходных размеров, является ограничение по твердости обрабатываемых деталей. Метод ДР надежно реализуется при твердости заготовки не более НВ 220, т.е. только для незакаленных деталей.**

тельно отличаются от характеристик металлической основы по таким показателям, как коэффициент термического расширения, твердость, модуль упругости и др. В то же время, именно керамические и метал-

локерамические покрытия обладают наилучшим комплексом свойств, обеспечивающим высокие эксплуатационные показатели деталей машин.

Прочность и надежность сцепления покрытий с основой существенно зависит от макро- и микрогеометрических параметров поверхности восстанавливаемой детали. Для сталей обработка детали методом деформирующего резания обеспечивает увеличение площади поверхности до 5 раз. Поскольку прочность адгезионных связей покрытия



б)

с деталью определяется площадью его сопряжения с основным материалом детали, очевидно, что макрорельеф, получаемый при ДР, является удачным вариантом подготовки поверхностей для последующей операции нанесения керамических и твердосплавных покрытий газотермическими методами.

Покрытия, наносимые на оребренную поверхность, могут заполнять межреберный зазор полностью (рис. 9а) или частично (рис. 9б). Оребренная структура с незаполненным межреберным промежутком является демпфирующим слоем между основой детали и формируемым покрытием, способным компенсировать несоответствие их термических деформаций при нагреве. Частичное заполнение покрытий достигается либо за счет наклонного оребрения, либо установкой сопла, наносящего покрытие, под углом к напыляемой поверхности, либо соответствующим выбором зернистости напыляемого порошка.

Разработчиками технологии проведена оценка повышения прочности сцепления в случае термоударных нагрузок плазменно-напыленного керамического покрытия ( $Al_2O_3$ ), нанесенного на поверхность стального вала после ДР. Результаты испытаний были таковы: покрытие на поверхности (предварительно подготовленной пескоструйной обработкой и черновым точением) выдержало не более 3 циклов "нагрев до 1223К – резкое охлаждение в воду", в то время как покрытие на поверхности, подготовленной методом ДР, выдержало 28 циклов.

Новым способом нанесения упрочняющих покрытий является сверхзвуковое газопламенное напыление, технология которого была разработана в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Подготовка поверхности стальных деталей методом ДР позволила использовать этот способ для напыления твердосплавных покрытий толщиной до нескольких миллиметров, что было неосуществимо при традиционных способах подготовки поверхностей (рис. 10).

Нами апробировано нанесение твердосплавных покрытий на рабочую поверхность стальных колец деформирующих прошивок. После оребрения наружной поверхности колец с шагом 0,6 мм, высотой профиля 0,7 мм и шириной канавки между ребрами 0,2 мм

проводилось нанесение твердосплавного покрытия на установке СГН1. Использовался порошок марки Sulzer Metco Diamalloy 2004 (Германия), содержащий 88% карбида вольфрама и 12% кобальта, с размером частиц порошка 11...45 мкм (аналог твердого сплава ВК12). Испытания в заводских условиях прошивки из 12 колец показали работоспособность твердосплавного покрытия в условиях больших контактных давлений и сдвиговых нагрузок. Отслоения твердого сплава от основы колец (сталь 40Х) зафиксировано не было.

Напыление твердого сплава или керамики в межреберный зазор с последующим шлифованием позволяет при восстановлении деталей создавать структуру поверхности, показанную на рис. 11.

**Разработчиками технологии ДР предложен вариант восстановления посадочных размеров валов или втулок, при котором можно заранее обеспечить различие в величинах усилий запрессовки и выпрессовки (т.е. когда способность вала или втулки воспринимать осевые нагрузки намного превышает усилие их сборки).**

Это уже не покрытие в традиционном понимании, это – модифицированный поверхностный слой, имеющий композиционную структуру с вертикальным расположением упрочняющих слоев. Твердый сплав или керамика, имеющие

высокие показатели по износостойкости, "защемлены" в пластичных стальных слоях, что обеспечивает для них отсутствие изгибных или сдвигающих нагрузок. Наличествуют только напряжения сжатия. А нужно учитывать, что у хрупких материалов предел прочности на сжатие в 3...4 раза больше, чем предел прочности на изгиб или растяжение. Иначе говоря, восстановленная поверхность будет работоспособна в условиях сдвиговых, ударных и термоударных нагрузок благодаря обеспечению твердым сплавом или керамикой высоких показателей по износостойкости.



Рис. 11. Композиционная структура поверхности восстановленной детали.

Композиционную структуру поверхности с чередованием слоев различной твердости можно также получить путем химико-термической обработки (ХТО) детали с оребрением, полученным деформирующим резанием (рис. 12). Толщина модифицированного слоя определяется высотой ребер, а структура упрочненного слоя – режимами ХТО и ДР.

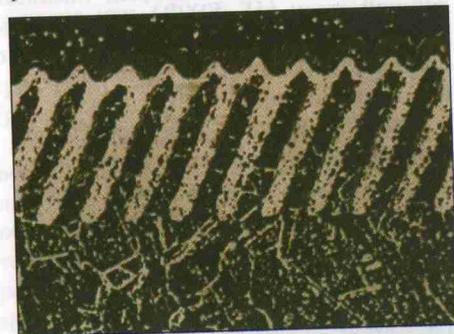


Рис. 12. Композиционная структура поверхности с вертикальным расположением упрочняющих слоев, полученная комбинацией метода ДР и последующей химико-термической обработкой. Сталь 20Х13, низкотемпературная нитроцементация.

Метод ДР позволяет не только многократно повысить площадь адгезионной связи наносимого покрытия с основой, но и реализовать анкерный ("замковый") эффект удержания наносимого покрытия. Такой эффект обеспечивает оребрение с расширением межреберного зазора у дна канавок, наклонное оребрение, а также шипы, причем загнутые шипы дают наибольшую надежность соединения покрытий с деталью (рис. 13). В то же время получение наклонных ребер является наиболее технологичным способом создания макрорельефа, обладающего анкерным эффектом, поскольку легко реализуется разворотом резцедержателя токарного станка.

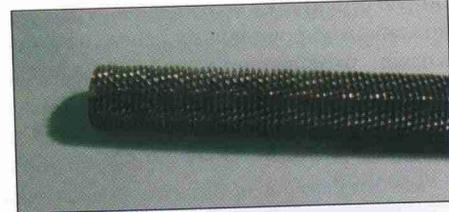


Рис. 13. Макрорельеф в виде шипов, обладающий анкерным эффектом, предназначенный для последующего нанесения покрытий. Сталь 12Х18Н10Т.

При воздействии предельных (разрушающих) сдвиговых нагрузок на покрытие, нанесенное на макрорельеф, полученный методом ДР, зафиксировано отсутствие отслоения покрытия от основного материала детали. Граница покрытия и основы перестала быть

критическим местом по прочности. Покрытие не отслаивается, как это происходит при традиционной подготовке поверхности, а разрушается по всей своей толщине. Поэтому предельное сдвиговое усилие, которое способно выдержать покрытие, значительно возрастает.

**ПРИМЕНЕНИЕ ДР ПРИ СКЛЕИВАНИИ ДЕТАЛЕЙ**

Анкерный эффект макрорельефа, получаемого при деформирующем резании, может быть также эффективно использован при подготовке деталей под последующее склеивание. Эта особенность макрорельефа была применена, например, при подготовке поверхностей детали из стали 12Х18Н10Т для последующего их склеивания с керамическими деталями. Макрорельеф представлял собой наклонное оребрение с шагом 0,2 мм, высотой профиля 0,3 мм и межреберным зазором 66 мкм.

Особую значимость подготовка методом ДР поверхностей под склеивание имеет для материалов с низкой адгезионной способностью. Например, фторопласт Ф4 не может быть приклеен без специальной химической подготовки поверхности, при этом качественная обработка может быть проведена только самими предприятиями-изготовителями фторопласта. А необходимость приклеить ленту или деталь из фторопласта часто возникает при ремонте или модернизации узлов трения скольжения. В этом случае обработка фторопластовой ленты или детали методом деформирующего резания является универсальным, недорогим и надежным средством ее подготовки под склеивание.

**ПРИМЕНЕНИЕ ДР СОВМЕСТНО С РЕМОНТО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫМИ СОСТАВАМИ**

Следует отметить, что создание композиционной структуры поверхности и реализация анкерного эффекта удержания покрытий актуальна не только в ремонтных технологиях, но и при создании новых деталей.

В предыдущей части статьи указывалось на перспективность применения ремонтных составов для восстановления размеров. Основной недостаток ремонтных составов — малая несущая способность покрытия, а также недостаточная прочность его сцепления с основным материалом детали. Выше (в разделе "Способы подавления нежелательной пористости") нами упомянут вариант использования ремонтных составов

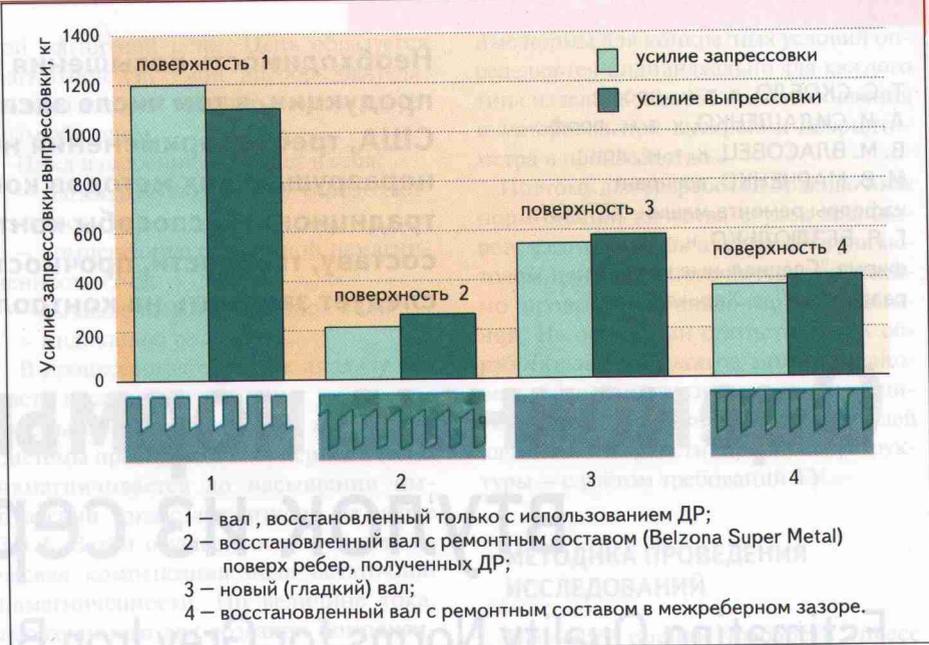


Рис. 14. Усилие запрессовки и выпрессовки восстановленных валов при натяге 20 мкм по сравнению с новым валом (поверхность №3).

совместно с ДР, полностью устраняющий вышеуказанные недостатки.

Это достигается тем, что ремонтные составы используются только для заполнения межреберного зазора. Увеличение размеров детали производится обработкой методом ДР, при этом несущая способность поверхности обеспечивается уже не ремонтным составом, а металлическими ребрами, выходящими на поверхность детали. При заполнении межреберного зазора полностью устраняется возможность отслоения ремонтного состава, повышается удобство его нанесения (шпатель при нанесении базировается по вершинам ребер), значительно сокращается расход дорогостоящего ремонтного состава, устраняются операции пескоструйной обработки и обезжиривания. Результаты испытаний восстановленных валов по усилиям запрессовки-выпрессовки показаны на рис.14. Как указывалось ранее, наибольшее повышение усилий достигнуто для вала, восстановленного только методом ДР (вал №1). Для вала №4 с выходом вершин ребер показатели несколько хуже, чем для нового, но существенно (почти в два раза) превышают показатели, характерные для случая, когда в контакте находится только ремонтный состав без металлических прослоек.

Для наглядности демонстрации возможностей варианта восстановления на основе метода ДР и ремонтных составов, на рис.15 приведена фотография

вала с участками, восстановленными различными способами. Над фотографией показана структура восстановленной поверхности. На ряде предприятий по предлагаемому методу было осуществлено восстановление крупногабаритных (весом до 1 тонны) деталей теплоэнергетического оборудования.

Проведенный анализ возможностей использования деформирующего в технологиях восстановления показывает его перспективность и высокую эффективность — причем как непосредственно самого метода, так и в комбинации его с наиболее современными восстановительными технологиями.

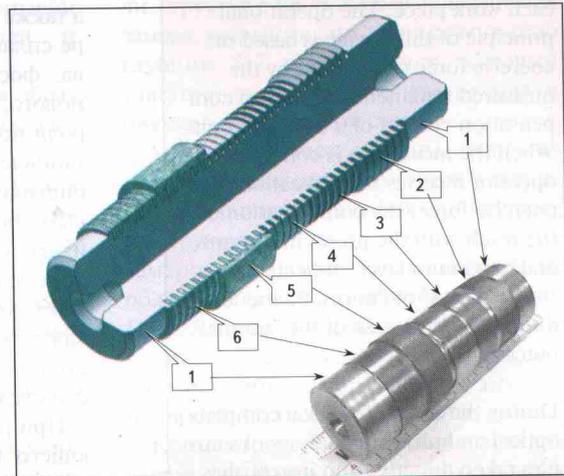


Рис. 15. Варианты восстановления вала с использованием ДР и ремонтных составов: 1 — участки вала до восстановления, 2 — ребра после процесса ДР, 3 — восстановленный участок с удаленным заострением ребер, 4 — восстановленный участок с развальцовкой вершин ребер, 5 — восстановленный участок с ремонтным составом внутри ребер и над ними, 6 — восстановленный участок с ремонтным составом между ребрами.