

# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ЗАКАЛКЕ С НАГРЕВА ТВЧ

Гурченко П.С., Михлюк А.И.  
Минский автомобильный завод  
Солонович А.А., Стрижевская Т.Н.

Белорусский национальный технический университет

Долговечность деталей машин чаще всего определяется прочностными характеристиками рабочих поверхностей. В результате упрочнения деталей термической обработкой неизбежно происходят изменения геометрических размеров, что может приводить к браку в процессе изготовления. При индукционной закалке неизбежны остаточные изменения первоначальных геометрических размеров деталей. Это связано как с тепловым расширением детали при нагреве и объёмными изменениями при фазовых (структурных) превращениях, что характерно для всех видов термической обработки.

На Минском автомобильном заводе индукционную закалку применяют при упрочнении более 460 наименований деталей, среди которых:

- осевые детали цилиндрической формы, которые составляют около 74%,
- детали сферической формы, составляющие около 11%,
- детали плоской формы — 7%,
- прочие детали (внутренние и наружные зубчатые венцы, шлицевые поверхности, галтели, и др.) составляющие около 8%.

Для термообработки вышеуказанных групп деталей применяются следующие виды термического упрочнения деталей машин операцией закалки с нагрева токами высокой частоты:

- одновременная закалка;
- объёмно-поверхностная закалка;
- непрерывно-последовательная закалка.

Установление основных закономерностей. Практический опыт работы в области индукционной закалки позволил установить ряд общих закономерностей в деформациях и короблении поверхностно упрочнённых изделий.

Закономерности связанные с объёмными изменениями при фазовых (структурных) превращениях. Как известно, при превращении аустенита в мартенсит происходит увеличение удельного объёма, что связано с тем, что удельный объём

мартенсита больше чем удельный объём феррито-перлитной смеси или аустенита. Чем больше содержание углерода в стали, тем больше увеличение объёма изделия при закалке. Так для среднеуглеродистых сталей, широко применяемых при индукционной закалке, характерны следующие значения увеличения объёма: сталь с 0,6% С — 0,5%, 0,5% С — 0,3%, 0,3% С — 0,15–0,1%. При этом следует помнить, что увеличение объёма при закалке не всегда приводит к увеличению размеров. Как правило, при увеличении одних размеров, например длины, происходит уменьшение других, например — диаметра при закалке непрерывно-последовательным способом длинномерных изделий.

Формоизменение геометрических размеров деталей при всех вышеперечисленных способах термической обработки происходит в результате следующих факторов:

- формоизменение за счет перестройки кристаллической решетки при нагреве и охлаждении;
- формоизменение за счет изменения удельных объёмов в результате структурных превращений.

## Одновременная закалка ТВЧ

Примером одновременной закалки может служить деталь 54321-2405051 — «ступица шестерни» (рис. 2), в которой упрочняемыми поверхностями являются торец и шлицевое отверстие (рис. 1).

Характер распределения зон закалки ТВЧ можно увидеть на рис. 1. Упрочняемая деталь из стали 40Х (см. табл.1).

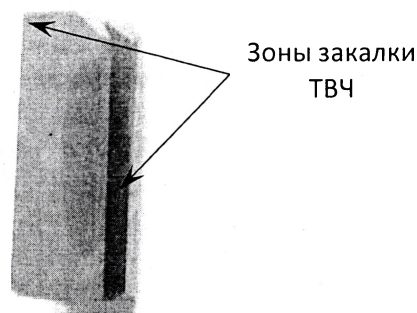


Рис. 1. Расположение зон закалённого ТВЧ слоя

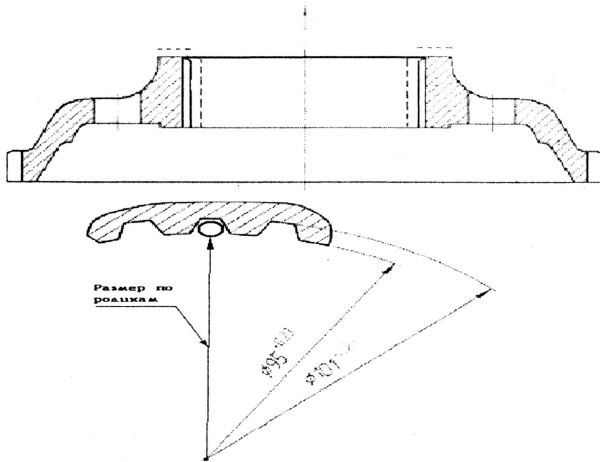


Рис. 2. Вид детали ступица шестерни и некоторые ее контролируемые параметры

Толщина закаленного ТВЧ слоя на торце — 2,0 мм. Твердость закаленного ТВЧ слоя на: торце — 50–52; шлицах — 56 HRC.

Химический анализ материала ступицы шестерни

C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	Cr, %	Ni, %	Cu, %	Сталь 40 X ГОСТ 4543-71
0,38	0,22	0,70	0,014	0,015	0,88	0,10	0,15	

Исследованиями установлено, что при закалке ТВЧ указанных на рисунке пунктиром поверхностей происходит их коробление. Для более подробного рассмотрения характера коробления вышеуказанной детали ее следует разделить на простейшие фрагменты:

**Плоская поверхность**

Торец детали в поперечном разрезе представляет собой закаленную плоскую поверхность.

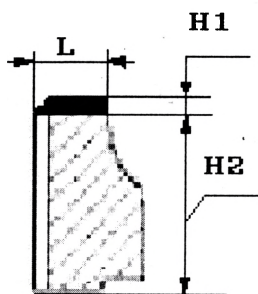


Рис. 3. Расположение закаленного и незакаленного ТВЧ слоя на плоской поверхности детали ступица шестерни: H1 — закаленный слой; H2 — незакаленный слой; L — длина закаленного слоя

Практически невозможно избежать коробления при односторонней закалке плоских изделий, величина коробления зависит от соотношения глубины закаленного слоя и толщины изделия, однако в данном случае асимметрия слоя заложена

конструктивно, и как тепловые, так и структурные объемные изменения в закаливаемом слое неизбежно приводят к возникновению значительных внутренних напряжений, которые вызывают изменение формы.

Коробление данного фрагмента детали можно рассмотреть на примере коробления балки при односторонней поверхностной закалке (см. рис. 4).

Односторонний нагрев плоского изделия вызывает в начальный период появление в наружном слое сжимающих напряжений, которые искривляют его, создавая выпуклость со стороны нагрева (рис. 4, 2). По достижении температуры, при которой предел текучести резко снижается и сталь становится пластичной (550–600 °С), внутренние напряжения сжатия вызывают в нагретом слое пластическую деформацию — нагретый слой будет увеличивать свою толщину за счет сокращения длины. Плоская поверхность начинает выпрям-

Таблица 1

ляться (рис. 4, 3). К моменту достижения закалочной температуры (840–860 °С) сталь делается настолько пластичной, что внутренние напряжения почти полностью снимутся. Некоторый переходный слой может сохранить напряженное состояние, но он не определяет величины деформации балки. Балка полностью выпрямляется. Чем глубже прогрев, тем больше степень пластической деформации, тем больше утолщение нагретого слоя.

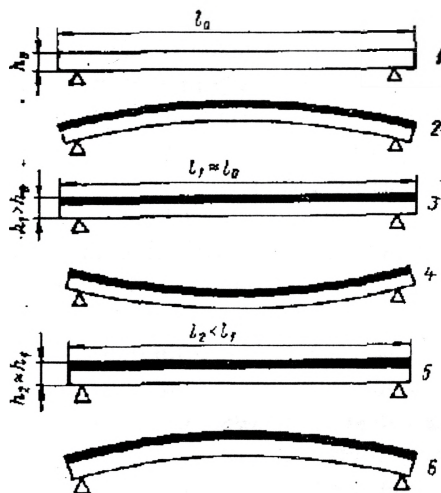


Рис. 4. Последовательность коробления балки при односторонней поверхностной закалке (нагрев сверху)

Таким образом, к моменту начала охлаждения закаливаемый слой будет несколько толще и короче, чем он был бы при свободном термическом расширении. Изменение размеров может составить при указанных выше условиях нагрева до 1% первоначальных размеров.

При охлаждении в начальный период также будет происходить пластическая деформация, однако температура поверхности быстро достигает уровня, при котором сталь становится непластичной и деформация переходит в упругую. Слой укорачивается, и по окончании процесса он будет короче, чем был после нагрева, и тем более короче исходного, т.е. до термической обработки. Если при охлаждении в металле не происходит каких-либо фазовых превращений с увеличением объема или их объемный эффект незначителен, то после полного охлаждения сохранится вогнутость.

Деформации, возникающие при поверхностной закалке, более благоприятны, чем при объемной закалке, так как они протекают в одной плоскости. Однако величина их все же велика. При односторонней закалке поверхностного слоя на структуру мартенсита конечное коробление может иметь другой характер. По достижении в процессе охлаждения температуры начала мартенситного превращения начнется процесс с увеличением удельного объема. Закаливаемый слой начнет удлиняться и компенсирует влияние тепловых объемных изменений. При полной закалке на мартенсит в средне- и высокоуглеродистой стали структурные объемные изменения чаще всего превосходят тепловые. Торцы ступицы шестерни сначала выровняются, сделаются плоскими, а затем появится выпуклость со стороны закаленного слоя.

### Цилиндрическая поверхность

При рассмотрении характера коробления внутреннего шлицевого отверстия ступицы шестерни, его необходимо разбить на несколько фрагментов:

*Цилиндр с закаленной внутренней поверхностью*

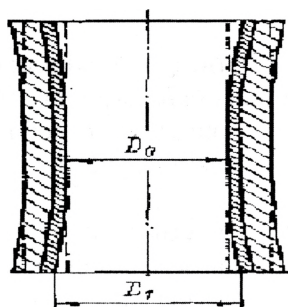


Рис. 5. Деформация полого цилиндра при поверхностной закалке внутренней поверхности

Коробление внутреннего шлицевого отверстия детали ступица шестерни (рис. 6) происходит по механизму коробления полого цилиндра при поверхностной закалке внутренней поверхности (см. рис. 5).

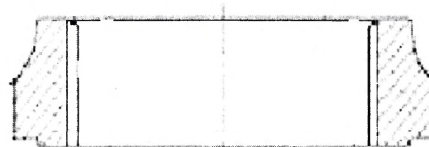


Рис. 6. Фрагмент внутренней цилиндрической части детали ступица шестерни

При быстром охлаждении нагретого ТВЧ слоя образуется мартенсит на конечной стадии охлаждения при температуре 200–250 °С начнется увеличение удельного объема в закаливаемом слое. Это приводит к осевому удлинению поверхностных слоев цилиндра. При поверхностной закалке полых цилиндров величина деформации зависит от толщины стенки, соотношения толщины стенки и диаметра цилиндра, от относительной глубины закаленного слоя. Во всех случаях при закалке полых цилиндров можно ожидать большую величину деформации, в частности, увеличения наружного диаметра. Объясняется это тем, что тонкая стенка цилиндра способна деформироваться и в меньшей степени, чем сплошной цилиндр, сдерживает естественное расширение закаливаемого слоя при образовании мартенсита. При этом при закалке внутренней поверхности — наблюдается появление «корсетности» (рис. 5).

Измерениями внутреннего диаметра ступицы шестерни до и после термообработки установлено, что после закалки внутреннего шлицевого отверстия при измерении диаметров вершин и впадин шлицев, так же наблюдается появление «корсетности».

### Внутренняя шлицевая поверхность

Характер коробления внутренней шлицевой поверхности имеет сложный характер от большого числа факторов.



Рис. 7. Расположение закаленного ТВЧ слоя по внутренней шлицевой поверхности



При измерении геометрических размеров шлицевого отверстия таких как размер по роликам и направление шлица можно прийти к выводу, что как и в приведенных выше примерах коробление имеет следующий характер: по всем закаленным плоскостям наблюдается выпуклость со стороны закаленного ТВЧ слоя, так как происходит уменьшение размера по роликам и увеличение расстояния от вертикальной оси до плоскости шлица, данное явление связано с тем, что толщина закаленного ТВЧ слоя на много меньше, чем толщина основного металла, не подвергающегося структурным превращениям.

Характер общего коробления детали при закалке ТВЧ можно увидеть на рис. 8, где происходит наложение всех перечисленных факторов.

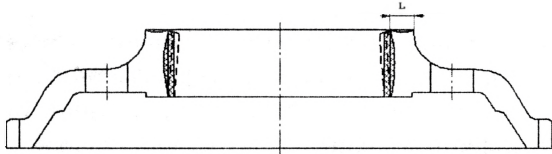


Рис. 8. Характер коробления детали ступица после закалки ТВЧ

При закалке ТВЧ указанных на рис. 8 поверхностей (заштрихованные области) коробление детали происходит в следующем порядке:

1. После закалки торцевой поверхности ступицы между закаленным слоем и незакаленным возникнут сжимающие напряжения и закаленный слой будет стремиться стать выпуклым (смотри п.1 выше) за счет увеличения его длины  $L$ , указанной на рисунке 8.

2. При нагреве шлицевого отверстия до закалочных температур в интервале 550–600 °С нагретый металл шлицевого отверстия становится достаточно пластичным для того чтобы деформироваться под действием внутренних напряжений образовавшихся при закалке торца ступицы. При закалке шлицевого отверстия коробление происходит по механизму рассмотренному выше в п. 2. В результате этого происходит усадка внутреннего шлицевого отверстия указанная на рис. 8 пунктирной линией.

Приведенные примеры характеризуют возможные изменения размеров деталей простой формы при их симметричной закалке. Описанный характер изменения размеров может быть предусмотрен при предварительной механической обработке, что может позволить при поверхностной закалке уложиться в заданную точность размеров изделия.

В результате проведенных опытно-исследовательских работ установлено:

– закалка ТВЧ торцевой поверхности приводит к образованию конуса (усадки). Диаметр отверстия под протяжку ( $\varnothing 95^{+0,23}$  мм.) после закалки торца ступицы шестерни в среднем уменьшается на 0,10–0,12 мм на расстоянии 5–7 мм от условно обозначенного «верх» детали;

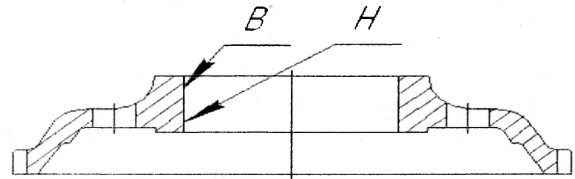


Рис. 9. Условные обозначения мест расположения контролируемых параметров в детали: В — условно обозначенный «верх» детали; Н — условно обозначенный «низ» детали

Закалка шлицевого отверстия приводит к уменьшению конуса по диаметру  $\varnothing 95^{+0,23}$  мм в среднем до 0,08 мм, образовавшегося при закалке торцевой поверхности (за счет отпуска закаленных слоев при последующем нагреве под закалку).

При термической обработке ТВЧ параметры, определяющие направление шлицев изменялись следующим образом:

–  $\alpha$  — угол наклона поверхности шлица от вертикальной оси в градусах составляет — до ТО —  $66,6 \div 103,9$ ; после ТО —  $48,2 \div 72,3$ ;

–  $\Delta$  — максимальное расстояние от поверхности шлица до вертикальной оси указанное в микронах и составляет — до ТО шлицов  $5,5 \div 107,9$ ; после ТО шлицов  $17,8 \div 104,9$ .

Термическая обработка с нагрева ТВЧ внутреннего шлицевого отверстия приводит к изменению следующих контролируемых параметров:

– уменьшение размера по роликам  $\varnothing 89,981_{+0,149}^{+0,061}$  мм (диаметр ролика 4,773 мм) в среднем на 0,062–0,063 мм;

– уменьшение диаметра вершин шлица ( $\varnothing 95^{+0,23}$  мм) составляет в среднем 0,045–0,046 мм;

– уменьшение диаметра впадин шлица ( $\varnothing 101^{+0,23}$  мм) составляет в среднем 0,069–0,090 мм.

**Объемно-поверхностная закалка (ОПЗ) с нагрева токами высокой частоты**

Характерным примером коробления деталей сложной формы может служить ОПЗ шестерен и сателлитов.

Объемно поверхностная закалка ТВЧ заключается в объемном нагреве детали в индукторе (индукторах) с последующим охлаждением в закалочном баке либо в спреере быстро движущимся потоком воды.

Примером детали с вышеуказанным способом термообработки на РУП «МАЗ» может послужить деталь — 5336-2405035 — «сателлит» из стали 60ПП.

Нагрев данной детали производится ступенчато на трех позициях нагрева с последующим охлаждением с спрейере быстро движущимся потоком воды.

В результате корректировки конфигурации индуктора, частоты и скорости нагрева удалось добиться максимальной равномерности нагрева детали, указанной на рис. 10.

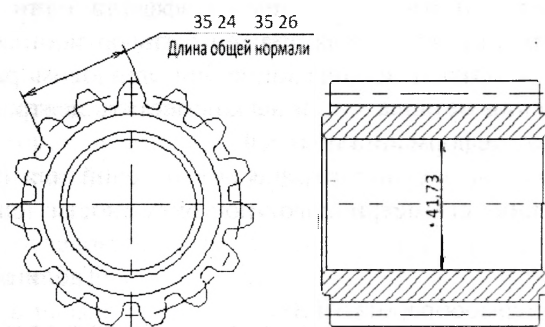


Рис. 10. Общий вид детали 5336-2405035 — сателлит

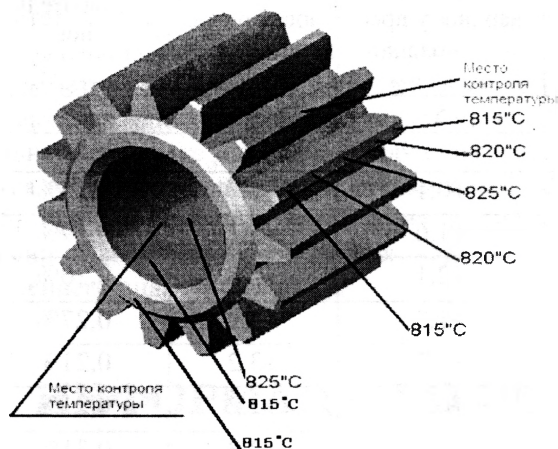


Рис. 11. Распределение температур нагрева под закалку в различных частях детали

Рассмотрим характер коробления детали сложной формы при ОПЗ.

Как и в предыдущем примере, деталь можно разбить на несколько видов простых форм и рассмотреть характер их коробления:

#### Плоская поверхность

К плоской поверхности можно отнести торцы сателлитов, торцы зубьев и вершины зубьев. Характер коробления данных плоских поверхностей аналогичен по механизму, описанному выше для торцов ступиц т.е. плоская поверхность при закалке на мартенсит особенно при относительно высо-

кой толщине будет стремиться стать выпуклым.

Так же к механизму формоизменения как и у плоской поверхности можно отнести изменение формы профиля зуба, он будет стремиться стать более выпуклым, что приведет к увеличению толщины зуба. Данный параметр контролировался, при измерении длины общей нормали. Исследованиями установлено, что при ОПЗ параметр длины общей нормали — увеличивается. Размер до термообработки — 35,2 мм, а после термообработки 35,28 мм.

#### Цилиндрическая поверхность

При термообработке деталей с внутренней цилиндрической поверхностью при сквозном прогреве наблюдается явление обратное описанному примеру ранее при одновременной закалке ТВЧ внутренней цилиндрической поверхности — явление «бочкообразности». При ОПЗ внутренняя цилиндрическая поверхность становится бочкообразной и внутренний диаметр сателлитов при измерении, как показан размер 41,73 мм., на рис. 9 увеличивается до 41,82 мм.

#### Непрерывно-последовательная закалка ТВЧ

Объем осевых деталей, подвергаемых термообработке на РУП «МАЗ» очень велик, поэтому установление закономерностей их деформаций и коробления крайне важно для оптимизации общего технологического процесса. Особенно это важно для осевых деталей имеющих поверхности с достаточно высокой степенью точности и не подлежащие окончательной механической обработке после закалки ТВЧ, например наружные шлицевые поверхности.

Наиболее характерной деталью этого класса является полуось заднего моста автомобиля МАЗ. Как известно в большинстве автомобилей МАЗ применяется схема трансмиссии с понижающей планетарной колесной передачей, что определяет конструкцию полуоси. Это цилиндрическая деталь длиной 1060–1130 мм, диаметром 46–55 мм, имеющая наружные шлицевые поверхности по концам и подвергаемая непрерывно-последовательной закалке ТВЧ на частоте 2400 Гц по всей длине.

Схема термической обработки полуосей показана на рис. 12. При данной схеме закалки ТВЧ индуктор является одновременно нагревательным и охлаждающим элементом, деталь по отношению к индуктору при нагреве движется вниз, одновременно нагревая деталь до закалочных температур и охлаждая ее с критическими скоростями. В результате происходит закалка на мартенсит. Путем анализа собранных статистических



данных установлен следующие закономерности при закалке ТВЧ – длина полуоси увеличивается, диаметр полуоси и шлицев уменьшается. В табл. 2 показаны значения величин увеличения длины полуосей при закалке ТВЧ.

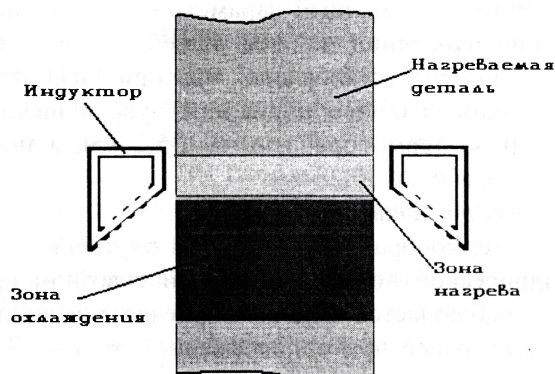


Рис. 12. Схема термической обработки полуосей

закалки ТВЧ происходит удлинение детали и длина её превышает верхнее значение поля допуска. Это требует введение технологического размера перед закалкой.

При жестком креплении в центрах станка нагрев даже небольшого по протяженности участка до закалочных температур вызывает тепловое расширение и удлинение полуоси. Так как полуось не может свободно расширяться, происходит искривление его оси, которое будет прогрессивно расти при продвижении очага нагрева вдоль оси валика. Во избежание такого эффекта один из центров станка всегда должен быть пружинным, чтобы усилия, возникающие при тепловом расширении металла могли легко сместить центр, не вызвав деформации полуоси.

При закалке цилиндрических изделий для получения симметричного по окружности слоя

Таблица 2

Удлинение полуосей до и после термообработки ТВЧ

№ п/п	До ТО		После ТО		Удлинение	
	фактическая длина, мм	длина по отношению к нижнему пределу поля допуска мм	фактическая длина, мм	длина по отношению к верхнему пределу поля допуска мм	абсолютное	относительное
1	2	3	4	5	6	7
Размер по чертежу $1063 \pm 1,3$ мм (1061,7 – 1064,3)						
1	1061,9	+0,2	1064,6	+0,1	+2,7	0,25%
2	1062,8	+1,1	1065,9	+1,6	+3,1	0,29%
3	1063,6	+1,9	1066,4	+2,1	+2,8	0,26%
4	1063,3	+1,6	1066,2	+1,9	+2,9	0,27%
5	1062,3	+0,6	1064,5	+0,1	+3,2	0,21%
6	1062,4	+0,7	1064,6	+0,2	+2,2	0,21%
7	1062,5	+0,8	1064,8	+0,5	+2,3	0,31%
8	1062,0	+0,3	1064,1	-0,3	+2,3	0,20%
Средняя величина удлинения					+2,69	0,25%
Размер по чертежу $1091 \pm 1,3$ мм (1089,7 – 1092,3)						
9	1091,4	+1,7	1094,4	+2,1	+3,0	0,27%
10	1090,4	+0,7	1093,3	+1,0	+2,9	0,26%
11	1088,0	-0,7	1091,0	-1,3	+3,0	0,27%
12	1094,2	+4,5	1097,0	+4,7	+2,8	0,26%
13	1090,6	+0,9	1093,0	+0,7	+2,4	0,22%
14	1091,0	+0,4	1093,2	+0,9	+2,2	0,20%
Средняя величина удлинения					+2,72	0,25%

Из анализа табл. 2 видно, что даже при изготовлении детали в поле допуска (столбец 3) после применяют вращение детали. Это позволяет ликвидировать влияние неоднородности нагрева в

местах токоподводов, разъемов индуктора, а также неоднородность охлаждения. Однако вращение не приносит пользы, если деталь неправильно центрирована (рис. 13, б). В этом случае создаются условия, подобные нагреву эксцентрика. При вращении сторона, наиболее удаленная от центра вращения, будет всегда ближе к индуктору и прогреется на большую глубину, чем противоположная сторона (рис. 13, а). Это вызовет искривление оси детали выпуклостью в сторону слоя большей толщины (рис. 13, б). Смещение центра вращения наблюдается при неправильном креплении детали в центрах станка. Если исправить этот дефект не удастся, то целесообразнее проводить закалку без вращения, тщательно выверив зазор между индуктором и деталью. На время охлаждения вращение должно быть включено.

При закалке длинномерных изделий непрерывно-последовательным способом деформация накапливается постепенно и небольшой эксцентриситет в начале процесса вызовет некоторое искривление оси. Это искривление увеличит эксцентриситет, и закалка следующих зон вызовет дополнительную деформацию, что еще увеличит эксцентриситет. Так по мере продвижения зоны закалки будет увеличиваться коробление полуоси.

Асимметрия закаленного слоя при закалке полых валиков или цилиндров вызывает появление овальности. Тот же характер коробления наблюдается при разнотолщинности стенки полого валика; причем величина коробления в сильной степени зависит от соотношения наружного и внутреннего диаметров валика.

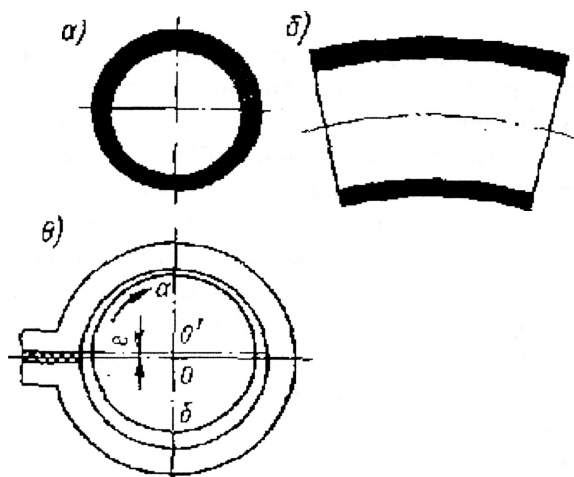


Рис. 13. Коробление валика с неравномерным по глубине закаленным слоем, вызываемое неправильной центровкой изделия:  $O$  – выточки на торцах валика для установки его в центрах станка;  $O'$  – геометрическая ось валика

**Заключение.** При индукционной термической обработке неизбежно происходят формоизменения геометрических размеров деталей. Это происходит из-за влияния огромного количества факторов. Часть факторов влияющих на коробление можно устранить, но исключить деформации при термической обработке невозможно. В настоящее время нет методики расчета изменения геометрических размеров деталей, по этому при разработке деталей необходимо учитывать фактор коробления при термообработке, а количественное выражение этого фактора определять опытным путем уже в процессе изготовления.

## ИНФОРМАЦИЯ О ВОДОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКЕ

Новиков А.А.

Физико-технический институт НАН Беларуси

С технологической точки зрения, процесс резания материалов на *установках* для гидроабразивного резания компании «Water Jet Sweden» представляет собой следующее.

С помощью насоса высокого давления вода под давлением 4100 Бар через соединительные трубки подается к режущей головке, в которой установлена форсунка с очень малым проходным сечением (0,08–0,5 мм). Вода, проходя через форсунку, конвертирует высокое давление в кинетическую энергию струи. Скорость водяной струи на выходе сопла достигает 900 м/сек. Затем, струя

воды, проходя через камеру смешивания, захватывает абразивные частицы, поступающие из бункера. Образованная таким образом смесь воды и абразива направляется на поверхность материала и разрушает его.

В качестве абразива (режущего инструмента) в установках *гидроабразивной резки* используется гранатный песок, поставляемый на Российский рынок ЗАО «Р-Гарнет». Благодаря своему кристаллическому строению, гранат как минерал обладает высокой прочностью и плотностью (3,6–4,1, что почти в два раза выше, чем у обыкновен-