

УДК 621.011.015

А.Н.Исаев проф., докт.техн.наук., С.А.Земляной, асп., А.Р. Лебедев доц., канд.техн.наук,
ИЭиМ ДГТУ, e-mail: anis101@yandex.ru

15. Дорнование отверстий сварных трубчатых заготовок при изготовлении составных цилиндров.

Представлены аналитические и экспериментальные результаты исследований процессов дорнования отверстий в цилиндрах из сварных труб. Определены режимные параметры процессов по условиям прочности сварных трубчатых заготовок. Приведены данные по точности и качеству обработанных отверстий.

Ключевые слова: дорнование отверстий, сварные трубы, натяг дорнования.

The analytical and experimental findings of processes burnishing holes in the cylinders of welded pipes. Defined rezhimnye process parameters on the conditions of strength of welded tubular zagotovok. Presents data on the accuracy and quality of processed holes.

Keywords: burnishing holes, welded pipe, tightness burnishing

Формообразование составного цилиндра методом дорнования отверстия.

При изготовлении составных цилиндров, работающих под давлением, в качестве заготовок применяют в основном бесшовные трубы. Толщина стенки выбранной трубы тем больше, чем больше давление и диаметр рабочей полости цилиндра.

Методы изготовления бесшовных труб сравнительно дороги, трубы имеют низкую точность отверстий, внутренняя и наружная поверхности трубы расположены эксцентрично по отношению друг к другу, толщина стенки неравномерна по сечению, поэтому ее толщину в большинстве случаев выбирают с большим запасом на последующую обработку. Заготовки из бесшовных труб металлоемки, велика трудоемкость их обработки, а коэффициент использования материала сравнительно мал. Большие натяги дорнования при обработке бесшовных труб способствуют их разрушению в процессе обработки.

Сварные трубы имеют ряд преимуществ по сравнению с бесшовными, так как формообразование исходных заготовок осуществляется из более дешевого листового проката с достаточно точной толщиной стенки. Поверхности внутреннего и наружного цилиндров практически концентричны, а неравномерность припуска на механическую обработку образуется только за счет погрешностей формы поперечного сечения трубы, размеры которого приближены к размерам готового изделия. Появляется возможность снижения массы погонного метра трубы и уменьшения припусков на механическую обработку отверстий.

Недостатком сварных труб является сравнительно малая толщина их стенок, поэтому сварные трубы эффективно применять для изготовления составных цилиндров. Составные изделия имеют преимущества перед монолитными по прочности, поэтому из них изготавливают корпуса гидроцилиндров, работающих при повышенных давлениях рабочей среды.

Прочность труб, применяемых для изготовления составных цилиндров, контролируется разными методами, один из которых, испытание на раздачу, наиболее близок к схеме деформирования дорнованием. По стандарту и техническим условиям предельное увеличение наружного диаметра бесшовной трубы при раздаче определяется следующим соотношением:

$$x_D = \delta_D / D_0 \leq x_{D_{\max}}, \quad (1)$$

где δ_D – приращение наружного диаметра трубы; D_0 – исходный наружный диаметр; $x_{D_{\max}}$ – предельно допустимый показатель раздачи трубы.

Во избежание разрывов, образования микротрещин, раскрытия пленов и закатов, других дефектов заготовок бесшовных горячедеформированных труб обычной точности величина относительного приращения $x_{D_{\max}}$ не должна превышать 5,5 – 6,0% ($x_{D_{\max}} = 0,055..0,060$), а относительный натяг дорнования $\lambda_\delta = i/d_0$, при котором обеспечивается соотношение (1), может быть рассчитан по формуле:

$$\lambda_\delta = x_{D_{\max}} / (1 - 0,5 \ln m)^3 \quad (2),$$

где m – относительная толщина стенки заготовки, равная отношению наружного диаметра к внутреннему.

Аналогичные испытания предусмотрены стандартом и для сварных труб, основным недостатком которых с точки зрения дорнования – является наличие сварного шва и сварного грата на поверхности отверстия. Прочностные возможности сварной трубы ограничены. Относительная неравномерность свойств сварной трубы в поперечном сечении не позволяет применять большие натяги дорнования.

В качестве аналога показателя предельной раздачи сварных труб можно принять степень экспандирования.

При изготовлении сварных труб раздача трубы гидравлическим давлением применяется как отделочная операция, при которой степень экспандирования не должна превышать 1,0 – 1,2%. Этот показатель значительно меньше, чем у бесшовных труб, что подтверждается

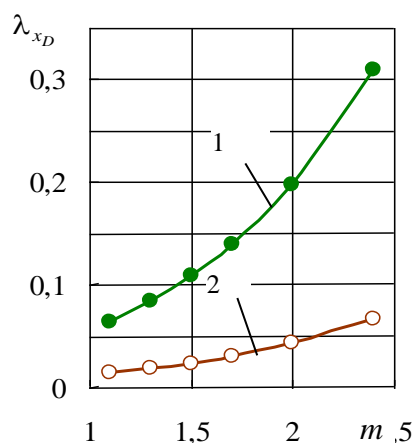


Рис. 1. Зависимости предельных относительных натягов дорнования λ_{x_D} бесшовных (1) и сварных (2) труб от относительной толщины стенки m

графиками на рис. 1. Видно, что сварные трубы, особенно тонкостенные, существенно уступают бесшовным по показателю предельной раздачи, поэтому их практически не используют для изготовления корпусов гидроцилиндров. Однако сварные трубы имеют ряд преимуществ, наиболее существенным из которых является их более высокая точность и меньшая металлоемкость. Связано это с тем, что прокатный лист имеет существенно меньшие отклонения толщины стенки от номинала, что позволяет изготавливать более точные трубы. Поле рассеяния отклонений отверстий и, следовательно, колебания натягов при дорновании сварных труб на 30..40% меньше, чем у бесшовных.

Заготовки для составных цилиндров выбирают из стандартного сортамента труб, дорнование которых возможно только при условии применения больших натягов, намного превышающих предельные по критерию допустимой раздачи. Чтобы использовать сварные трубы, необходимо создать особые условия деформирования. Выход из положения подсказан в работе [1], в которой приведены данные исследований процессов несвободного дорнования в обоймах.

Установлено, что одним из условий осуществления больших деформаций при дорновании трубчатых заготовок, в том числе сварных, является объемное напряженно-деформированное состояние сжатия материала в процессе обработки. При несвободном дорновании в обойме окружные деформации в области контакта дорна и заготовки практически отсутствуют, материал заготовки находится в состоянии всестороннего неравновесного сжатия, а радиальные, окружные и осевые напряжения сжимающие. Увеличение осевого сжатия вызывает дополнительное увеличение радиальных напряжений. Все это способствует получению положительного результата при использовании сварных труб.

Между обоймой и заготовкой при несвободном дорновании для облегчения предварительной сборки соединения обычно предусматривается зазор. Необходимые требования к заготовке основаны на правильном выборе размеров поперечного сечения трубы. Наружный размер (диаметр трубы – D_0) должен быть максимально приближен к диаметру отверстия обоймы. Для этого применяется предварительная механическая обработка заготовки или выполняется подбор необходимого размера из стандартного сортамента труб. Второй вариант предпочтительнее.

Выбор труб с подходящими размерами поперечного сечения рекомендуется производить по специально разработанной методике [1]. Предварительно из сортамента на сварные трубы выбирают несколько заготовок и определяют их предельные диаметральные размеры.

Предпочтение отдается заготовке, размеры которой позволяют осуществить процесс с наименьшим натягом дорнования, причем наружный диаметр должен ненамного отличаться по величине от диаметра отверстия обоймы. Выбранная заготовка должна удовлетворять следующим требованиям:

$$(d_{об} - D_0)/D_0 \leq x_{D_{max}} \quad (3),$$

$$\lambda_{\delta_{max}} \leq x_{D_{max}} / (1 - 0,5 \ln m_0)^3 \quad (4),$$

где D_0 , m_0 - наружный диаметр и относительная толщина стенки заготовки; $d_{об}$ - диаметр отверстия обоймы, определяемый с учетом соотношения (3); $\lambda_{\delta_{max}}$ - наибольший допустимый натяг дорнования.

Точность и качество заготовок из сварных труб, обработанных дорнованием.

Для оценки возможности применения процесса дорнования отверстий сварных трубчатых заготовок проведены специальные экспериментальные исследования. В ходе экспериментов определялись условия получения качественной заготовки в зависимости от натягов дорнования и толщины стенки обоймы. Обоймы были изготовлены из стали 45 с диаметром отверстия $\varnothing 34,5$ мм и наружными диаметрами 40,5; 44,5 и 50,5 мм, заготовки из электросварных труб, полученных путем свертывания на вальцах металлической ленты из стали с последующей сваркой токами высокой частоты, имели одинаковые геометрические размеры: наружный диаметр $D=33,7$ мм, внутренний $d=28,5$ мм. Длина всех образцов была одинаковой: $L=80$ мм. При дорновании использовался набор дорнов с увеличивающимися диаметрами через 0,5 мм (воспроизводилась схема многозубого дорнования). После каждого прохода дорна измерялись доступные геометрические параметры (диаметральные и осевые) по схеме на рис. 2. Схема дорнования заготовок приведена на рис. 3. При этом соединение «обойма – заготовка» в ходе эксперимента рассматривалось как двухслойная цилиндрическая оболочка. Процесс обработки соответствовал схеме дорнования в обойме.

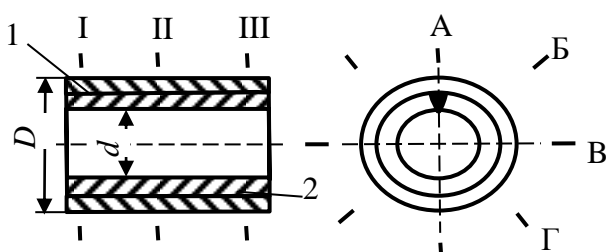


Рис. 2. Схема измерения образцов: 1 – обойма; 2 – втулка из сварной трубы

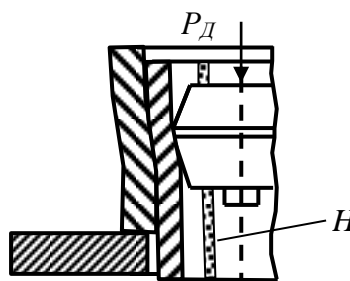


Рис.3. Схема несвободного дорнования отверстий трубчатых заготовок (H – сварной шов)

В процессе эксперимента наблюдалась картина изменения сварного шва и грата в отверстии. После прохода последнего зуба дорна производилась распрессовка соединения и определялись конечные размеры его элементов.

Исследования показали, что общая толщина стенки корпуса изменяется в основном за счет пластической деформации сварной заготовки, причем с увеличением толщины стенки обоймы влияние натяга резко снижается (рис. 4). Фактически, начиная с $m = 1,7$, приращение наружного диаметра корпуса не наблюдалось (рис. 5). Происходит это потому, что сварная трубчатая заготовка раньше переходит в пластическое состояние, толщина ее стенки изменяется существенно интенсивнее, чем у обоймы даже при сравнительно небольшой разности толщин стенок элементов корпуса. Можно сказать, что общее утонение стенки корпуса происходит за счет деформации его внутреннего элемента.

В целом эксперименты подтвердили, что благодаря всестороннему сжатию и повышению пластичности металла в очаге деформации, заготовка может быть выполнена

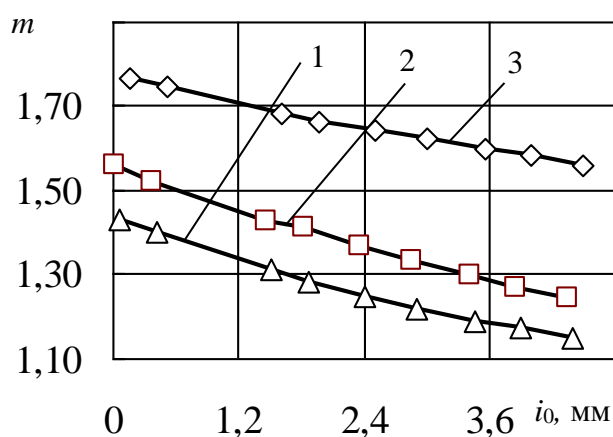


Рис. 4. Изменение относительной толщины стенки m составного корпуса с ростом натяга дорнования i_0 . Исходные значения m : 1 – 1,42; 2 – 1,56; 3 – 1,78

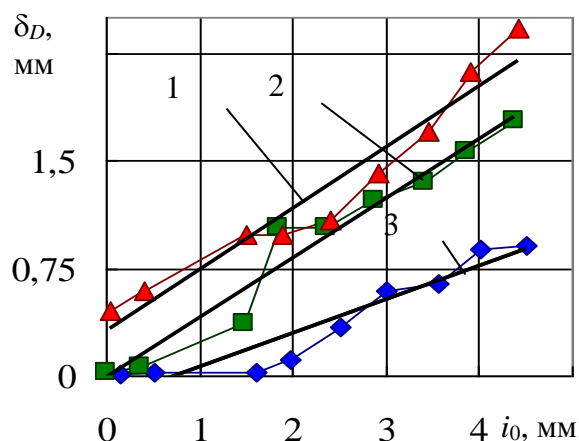


Рис. 5. Зависимость приращений наружного диаметра δ_D составного корпуса от натяга дорнования i_0 . Толщина стенки составного цилиндра, мм: 1 – 6; 2 – 8; 3 – 11

из сварной трубы и из менее пластичного материала, чем обойма, при этом заготовка в процессе обработки будет находиться в пластическом состоянии, в то время как обойма – в упругопластическом или даже в чисто упругом. Очевидно, что менее пластичный сварочный шов благодаря объемному напряженному состоянию в процессе дорнования в обойме будет находиться в пластическом состоянии, как и основной металл.

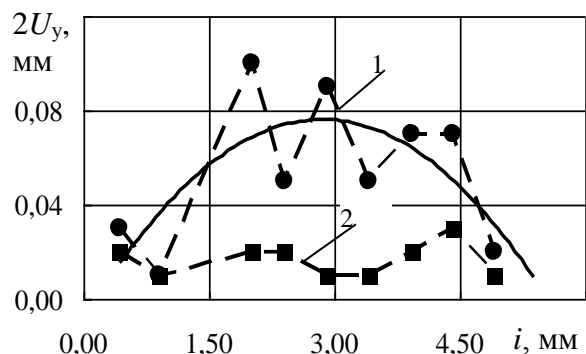


Рис. 6. Зависимость упругих смещений $2U_y$ по отверстию составного цилиндра от натяга дорнования i : 1- после дорнования; 2- после разборки соединения

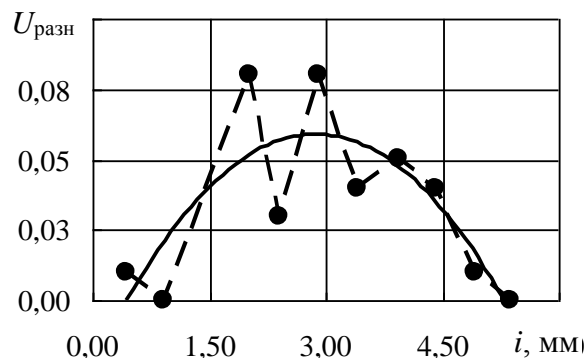


Рис. 7. Зависимость разностей упругих деформаций $U_{\text{разн}}$ по наружному диаметру наружной трубы составного корпуса от натяга дорнования

В процессе исследований отмечено, что в случае, когда первоначальный зазор между элементами корпуса превышал допустимую по критерию испытаний на раздачу величину, происходил разрыв заготовки по сварному шву. При дальнейшем дорновании отверстия место разрыва частично заполнялось деформируемым металлом, однако полностью трещина не закрывалась. После распрессовки увеличение наружного диаметра такой трубы не наблюдалось, что косвенно свидетельствует об отсутствии в ее стенке неравномерно распределенных остаточных напряжений.

Графики упругих смещений по отверстию внутренней трубы составного цилиндра после дорнования и разборки (рис. 6) иллюстрируют, что первая упругая деформация превышает вторую. Это свидетельствует о наличии давления на сопряженных поверхностях соединения. С увеличением натяга дорнования упругие смещения сначала растут, затем уменьшаются. Экстремальный характер изменения величины упругих смещений объясняется изменением давления в результате противоположного действия двух факторов: интенсивного упрочнения материала (особенно на начальной стадии деформирования) и прогрессирующего утонения стенки. При некотором сочетании параметров упрочнения и утонения стенки возникает наибольшее давление в соединении. С точки зрения качества соединения натяг, при котором это происходит, является оптимальным.

Закономерности изменения разностей упругих смещений от натяга дорнования по отверстию внутренней и по наружной поверхности наружной труб различны. В первом случае эта зависимость – линейная (кривая 2 на рис. 6), во втором – нелинейная с ярко выраженным максимумом (рис. 7)

Разности упругих смещений после дорнования и разборки (по отверстию и наружной поверхности) теоретически связаны с давлением на сопряженных поверхностях

соединения, которое можно рассчитать по величине изменения размеров элементов корпуса. Заменяем сопротивление наружной трубы внешним давлением, величина которого, согласно формуле Ламе для толстостенного цилиндра, связана с разностью упругих деформаций элементов $2U_n$ после дорнования и разборки соединения:

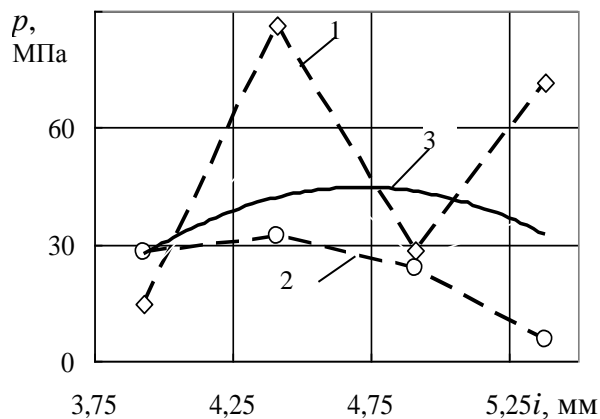


Рис. 8. Давление в сопряжении элементов составного цилиндра, рассчитанное по величине упругих смещений, от натяга дорнования i : 1 – наружной поверхности; 2 – внутренней поверхности; 3 – среднее давление в сопряжении двух цилиндров

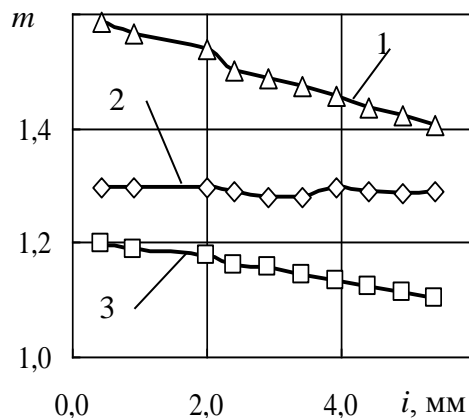


Рис. 9. Изменение относительной толщины стенки m составного цилиндра (1) и его элементов (2 – наружного; 3 – внутреннего) в зависимости от натяга дорнования i

$$p = 2U_B \cdot \frac{E}{2d_B} \left[\left(\frac{D_B^2}{d_B^2} - 1 \right) / \frac{D_B^2}{d_B^2} \right] \quad (5),$$

Аналогично действие внутренней трубы связано с разностью упругих деформаций элементов $2U_H$ наружной трубы после дорнования и разборки соединения:

$$p = 2U_H \cdot \frac{E}{2} \left[\left(\frac{D_H^2}{d_H^2} - 1 \right) / D_H \right]. \quad (6),$$

По приведенным формулам рассчитаны параметры и построены графики изменения давления в соединении в зависимости от натяга дорнования (рис. 8). Можно предположить, что истинные значения давления в соединении находятся в пределах, ограниченных верхним и нижним графиками, рассчитанными по данным измерений диаметров внутренней и наружной трубы.

Исследования подтвердили, что внутренняя труба раньше переходит в пластическое состояние, а толщина ее стенки изменяется существенно интенсивнее, чем у наружной, поэтому общая толщина стенки корпуса определяется в основном пластической деформацией внутренней трубы (рис. 9). Даже при сравнительно небольшой разности толщин стенок элементов соединения общее утонение стенки цилиндра происходит за счет внутреннего элемента. В данном случае суммарная

относительная толщина стенки изменилась не значительно. В целом эксперименты подтвердили, что благодаря всестороннему сжатию и повышению пластичности металла в очаге деформации, в общем случае заготовка может быть выполнена из сварной трубы и из менее пластического материала, чем обойма, при этом заготовка в процессе обработки будет находиться в пластическом состоянии, в то время как обойма – в упругопластическом или даже в чисто упругом. Очевидно, что менее пластичный сварочный шов благодаря объемному напряженному состоянию в процессе дорнования в обойме будет находиться в пластическом состоянии, как и основной металл.

В процессе дорнования наружная труба корпуса испытывает растягивающие деформации, внутренняя – сжимающие. После прохода дорна происходит частичное упругое восстановление пластически деформируемых труб и в их стыке образуются радиальные напряжения, аналогичные тем, которые возникают при запрессовке с некоторым натягом. Деформационный натяг образуется благодаря перераспределению напряжений после совместного деформирования обеих труб. Его величина равна разности измеренных диаметров поверхностей соединения после разборки. Экспериментально полученные результаты иллюстрирует график рис. 10. Видно, что деформационный натяг увеличивается с ростом натяга дорнования, но не пропорционально ему, а достаточно экстенсивно. Связано это, очевидно, с затуханием процесса упрочнения и утонением стенки внутренней трубы.

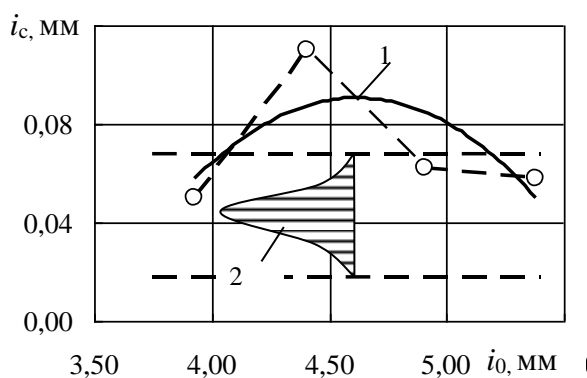


Рис. 10. Зависимость деформационного натяга i_c в соединении цилиндров 1 от суммарного натяга дорнования i_0 . Поле рассеяния среднего натяга посадки $H/7/s7 - 2$

В процессе исследований отмечено, что в случае дорнования составного корпуса происходит интенсивное изменение относительной толщины стенки сварной заготовки, а изменение относительной толщины стенки цилиндра происходит незначительно. Так же выявлена зависимость изменения давления p в соединении, рассчитанного по перемещениям, от натяга дорнования i .

Точность формы отверстий в поперечных сечениях составного цилиндра.

Заготовки из сварных труб имеют значительные отклонения формы от идеального концентричного цилиндра. Помимо макрогеометрических искажений типа «овальность» на поверхностях присутствуют дополнительные неровности, в частности, внутренний

сварочный грат, размеры которого регламентируются стандартом. Исходные искажения формы напрямую отражаются на точности обрабатываемых отверстий.

Для выявления эмпирической связи между исходными искажениями геометрии заготовки и отклонениями от округлости обработанных отверстий предварительно на основании теоретических зависимостей и практических данных были установлены факторы, под действием которых эта связь возможна. Такими факторами являются натяг дорнования, относительная толщина стенки заготовки и зазор между сопрягаемыми элементами составного цилиндра в исходном положении.

В процессе последовательного многозубого дорнования дорнующие зубья на первых этапах контактируют не со всей внутренней поверхностью трубы, а с ее частью. При малых натягах после прохода дорнующего зуба остаточные деформации малы, фактически происходит упругий возврат поперечного кольцевого сечения в исходное состояние с частичным восстановлением отклонений формы. С увеличением натяга форма сечения отверстия приближается к круговой, но некоторые участки заготовки находятся в полупругом состоянии и после прохода дорна некруглость все еще сохраняется. Дальнейшее увеличение натяга приводит к наступлению режима полной перезагрузки по всем радиальным направлениям с выравниванием механических свойств материала заготовки. Погрешность, соответствующая этому моменту минимальна.

На рис. 11 приведены графики отклонений от прямолинейности образующих

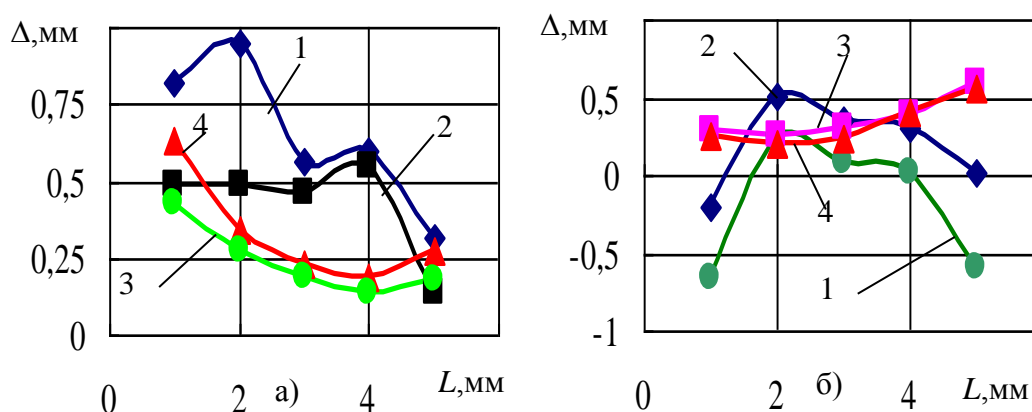


Рис.11. Отклонения от прямолинейности образующих наружной (а) и внутренней (б) поверхностей обоймы после однозубого (1,2) и многозубого (3,4) дорнования

наружной и внутренней поверхностей обойм, которые подвергались пластическому деформированию за счет раздачи внутренней сварной трубы (заготовки). Видно, что в случае многозубого дорнования отклонения от круглости по образующей наружного и внутреннего диаметра незначительны и ими можно пренебречь. При однозубом дорновании имеются большие погрешности формы отверстия. Объясняется это тем, что

при многозубом дорновании натяг увеличивался постепенно на 0,5 мм, что способствовало более высокой равномерности деформации. На графиках рис.11 видно, что отклонения формы образующих отверстия при многозубом дорновании в 2-3 раза меньше, чем при однозубом дорновании.

Главным технологическим и режимным фактором смещения всех поверхностей составного цилиндра является натяг дорнования i , от которого зависят интенсивности деформаций и напряжений, упрочнение материала и текущие размеры деформируемой заготовки. Для повышения точности обработки отверстий рекомендуется дорнование производить многозубыми дорнами.

Список литературы:

1. **Зайдес С.А., Исаев А.Н.** Технологическая механика осесимметричного деформирования. Монография. – Иркутск: Из-во ИрГТУ, 2007. – 432 с.

2. **Исаев А.Н.** Механико-математическое моделирование формообразующих операций в процессах изготовления изделий из трубчатых заготовок/ГОУ Рост. Гос. акад. С.-х. машиностроения, Ростов н/Д, 2004. — 271 с.

3. **Исаев А.Н., Земляной С.А.** Исследование процесса дорнования отверстий в сварных трубчатых заготовках. // Перспективные технологии получения и обработки конструкционных материалов. Сборник научных трудов Иркутск 2009 г. С 36–42.

4. **Исаев А.Н., Любимов Ю.В., Лебедев А.Р.** Деформации составных корпусов силовых цилиндров, изготовленных методом дорнования отверстия//Кузнечно-штамповочное производство. – 2003. – № 11. – С. 12 – 17.