

## МЕХАНИЧЕСКАЯ СХЕМА ДЕФОРМАЦИИ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ РАДИАЛЬНОМ ОБЖАТИИ (РЕДУЦИРОВАНИИ)

Исаев А.Н., Власкин С.В.

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

**Аннотация.** Рассмотрены особенности механических схем деформации при радиальном обжатии (редуцировании) трубчатых заготовок. Выявлены особенности выбора заготовок из труб. Определены направления развития теоретических и экспериментальных исследований с целью разработки методики проектирования оптимальных заготовок для деталей из трубного проката. Целью работы является подготовка научно-обоснованных рекомендаций по расширению возможностей применения деформационных методов упруго-пластической обработки при изготовлении деталей машин.

**Ключевые слова:** радиальное обжатие, редуцирование, калибрование, неконтактные деформации, геометрия участков деформации, упругие и пластические участки деформирования.

## MECHANICAL SCHEME OF DEFORMATION OF TUBULAR WORKPIECES FOR RADIAL COMPRESSION (REDUCTION)

Isayev A.N., Vlaskin S.V.

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

**Abstract.** The features of mechanical deformation schemes during radial compression (reduction) of tubular work pieces are considered. Peculiarities of the choice of blanks from pipes are revealed. The directions of development of theoretical and experimental research for the purpose of developing a design methodology for optimal blanks for parts made of rolled steel are determined. The purpose of this work is to prepare scientifically-based recommendations for expanding the possibilities of using deformation methods of elastic-plastic processing in the manufacture of machine parts.

**Keywords:** radial compression, reduction, calibration, non-contact deformations, geometry of non-contact deformation plots, elastic and plastic plots of deformation.

Процессы дорнования отверстий и **радиального обжатия** (редуцирования) наружных поверхностей трубчатых заготовок способствуют уменьшению трудоемкости механической обработки, заменяя черновые и нередко получистовые операции. В работах [1-3] показано, что особенностью этих процессов является возможность перемещения части металла с обрабатываемой поверхности в сторону необрабатываемой. В результате этого процесса происходит наращивание необрабатываемой поверхности и формирование на ней слоя припуска, достаточного для получения качественного результата при механической обработке.

Процессы свободного объемного **радиального обжатия** трубчатых заготовок не нашли широкого применения в технологиях черновых или чистовых операций обработки деталей из труб. Связано это с более сложной в конструктивном и технологическом отношении схемой многопроходной обработки длинных заготовок многозубыми инструментами по схеме растяжения, при которой достигаются наилучшие качественные показатели. В результате, несмотря на определенное сходство механических схем деформаций процессов редуцирования и дорнования первый из них фактически не исследован по точностным и другим показателям, и по этой причине в большинстве случаев не может быть использован также эффективно, как процесс дорнования отверстий.

Напряженное состояние в процессе обработки трубчатых заготовок редуцированием считается осесимметричным, при котором приложенные к наружной цилиндрической поверхности распределенные нагрузки расположены симметрично относительно его оси и одинаковы во всех меридиональных сечениях. Осесимметричное нагружение, являющееся частным случаем объемного, позволяет существенно упростить анализ напряженно-деформированного состояния материала в процессе деформирования.

Из приведенных на рисунке 1 схем главных деформаций и напряжений процессов редуцирования и дорнования следует, что несмотря на внешнее сходство их различительные

признаки существенны, что предопределяет неодинаковые результаты деформирования. Сравнение схем главных деформаций и напряжений редуцирования (с двумя деформациями растяжения) и дорнования (с двумя деформациями сжатия) позволяет сделать следующий вывод: редуцирование приводит к уменьшению диаметров и увеличению длины заготовки (схема сжатия), для дорнования характерны противоположные результаты (схема растяжения). Деформируемый металл в состоянии объемного всестороннего сжатия при редуцировании обладает более высокой пластичностью, чем при дорновании, что способствует повышению сопротивляемости изделия внешним технологическим и рабочим нагрузкам и возможному снижению металлоемкости.

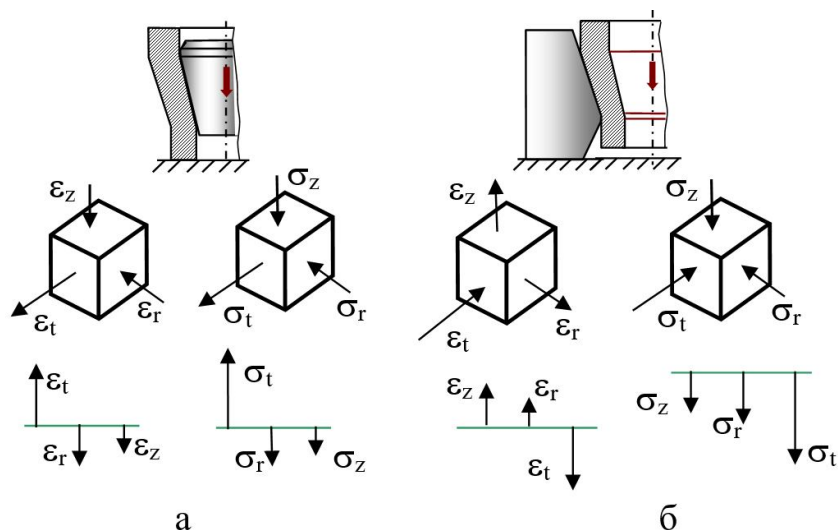


Рисунок 1. Схемы главных деформаций и напряжений  
а – Дорнование; б - Редуцирование

Следует отметить, что процессы дорнования и редуцирования трубчатых заготовок обычно рассматриваются отдельно, независимо друг от друга, вследствие существенного различия механических схем деформации. Однако, с целью расширения возможностей совместного или последовательного использования обоих методов, необходимо установить допустимые диапазоны размеров применяемых заготовок и активизировать развитие приближенных аналитических методов проектирования и экспериментальных исследований этих процессов. До сих пор задачи пластического формоизменения деформированием трубчатых заготовок не имеют точных решений, а приближенное их описание во многом основано на существенно различных для этих процессов условиях перехода деформируемого материала в пластическое состояние при внутреннем и наружном нагружении внешними силами.

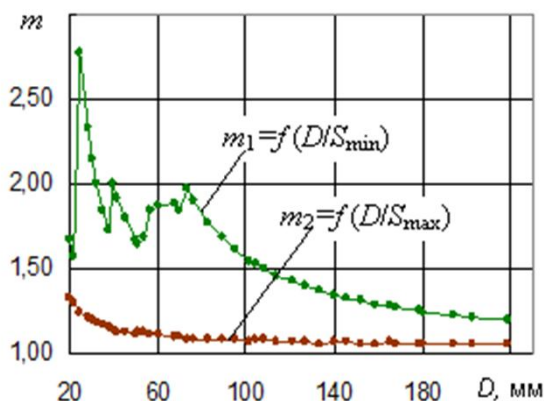


Рисунок 2 - Диапазон изменения относительных толщин стенок  $m$  трубчатых заготовок с наружным диаметром  $D$  в пределах допустимых значений толщин стенок от  $S_{min}$  до  $S_{max}$

Для обработки цилиндрических поверхностей дорнованием и редуцированием наиболее часто используется трубный прокат, размеры которого имеют принципиальное значение при выборе поперечного сечения заготовок. В основном используются стандартные трубы с заданными

отклонениями по наружному  $D$  или внутреннему  $d$  диаметру и толщине стенки  $S$  (форма заказа  $D \times S$  или  $d \times S$ ). Размерными характеристиками поперечных сечений стандартных труб являются относительные показатели, определяемые отношением наружного диаметра к толщине стенки ( $D/S$ ) или диаметру отверстия ( $m = D/d$ ). В зависимости от их значений трубы подразделяются на особотонкостенные ( $D/S$  более 40;  $m \leq 1,05$ ), тонкостенные ( $D/S$  от 12,5 до 40;  $1,05 < m \leq 1,2$ ), толстостенные ( $D/S$  от 6 до 12,5;  $1,2 < m \leq 1,5$ ) и особотолстостенные ( $D/S$  менее 6;  $m > 1,5$ ). Из приведенных данных следует, что практически весь стандартный трубный прокат ограничен размерами с показателем  $m \leq 1,5$  (рис. 2). Под дорнование и редуцирование в основном выбираются трубы с относительной толщиной стенки  $m$  в интервале 1,05..1,5, находящемся внутри стандартного диапазона. При выборе размеров трубчатых заготовок следует принимать во внимание отклонения формы поперечных сечений труб от округлости. Допустимые отклонения размеров, влияющие на величину отклонений, задаются стандартами.

Практика показала, что для получения высокой точности обработанной поверхности охватывающее деформирование пустотелых цилиндров необходимо проводить с малыми натягами, соизмеримыми с величиной упругого смещения после прохода инструмента. В случае, когда требуется упрочнить обрабатываемый материал, натяг должен быть сравнительно большим, например, 5% и более. Обеспечить обозначенные требования можно при использовании многозубых инструментов. Первый зуб фильеры работает с большим натягом, на калибрующее–выглаживающие зубья назначают натяги, ненамного превосходящие упругие смещения. В данном случае охватывающее деформирование пустотелых цилиндров проходит две стадии: упрочнение и калибрование. На первой стадии пластически деформируется все поперечное сечение цилиндра, последующее калибрование позволяет обеспечить размер и форму деформированной поверхности.

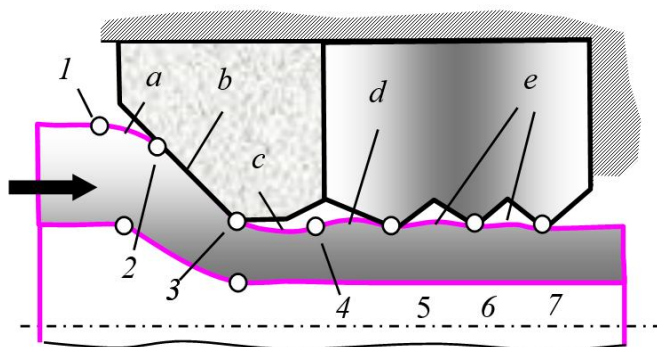


Рисунок 3 - Схема совмещения упруго-пластического и калибровочного режимов редуцирования при использовании многозубого инструмента

Для повышения жесткости технологической схемы операции редуцирования рекомендуется совмещать обработку с большими и малыми натягами путем применения составного или неразъемного инструмента. На рисунке 3 показана схема совмещения упруго-пластического и калибровочного режимов. Очаг деформирования в области наиболее нагруженного зуба разделен на специфические участки, различающиеся схемами напряженного состояния:  $a$  – внеконтактная упруго-пластическая;  $b$  – контактная;  $c$  – внеконтактная пластическая;  $d$  – упругого восстановления;  $e$  – калибрования. Границы участков отмечены точками 1..7.

На контактном участке переднего зуба длиной  $l_k$  происходит основная фаза упрочняющего этапа охватывающего деформирования. За пределами участка образуются передняя и задняя внеконтактные зоны деформации. Основными параметрами внеконтактной зоны на этапе упрочнения являются радиус пластического изгиба  $R_n$ , угол пластичности  $\theta_n$ , и высота волны  $h_b$ . Можно предположить, что вход стенки обрабатываемого цилиндра на конус инструмента и сход с него происходит под одним и тем же углом  $\theta_n$ , а радиусы изгиба стенки  $R_n$  на переднем и заднем участках внеконтактной пластической деформации одинаковы.

Относительный минимальный натяг, при котором возможна реализация этапа упрочнения, может быть рассчитан по эмпирической формуле в зависимости от относительной толщины стенки  $m$  и угла конуса инструмента  $\alpha$ :

$$\lambda_{\min} \geq m^{0,28} (0,04 \ln \alpha - 0,0137). \quad (1)$$

Для осуществления упрочнения необходимо, чтобы натяг обжатия был больше рассчитанного по формуле (1). В случае, когда  $\lambda_{\phi} \leq \lambda_{\min}$ , упрочнение незначительно, поэтому целесообразно натяг  $\lambda_{\min}$  считать нижней пороговой границей процесса упрочняющего охватывающего деформирования.

Натяги меньшие, чем  $\lambda_{\min}$ , соизмеримы с величиной упругого смещения, их целесообразно назначать на этапе калибрования.

Основными параметрами внеконтактной пластической зоны очага деформации на этапе упрочнения являются радиус пластического изгиба  $R_n$ , угол пластичности  $\theta_n$ , которые вместе определяют координаты точки касания заготовки с конусной поверхностью инструмента, и длина фактического контакта  $l_k$ . Взаимосвязь этих параметров при заданном натяге редуцирования  $i$  установлена в виде:

$$\theta_n = \arccos[1 - 0,5(i - 2l_k \sin \alpha) / R_n]. \quad (2)$$

Выражение (2) используется для определения радиуса свободного изгиба стенки цилиндра  $R_n$ , длины контакта  $l_k$  и высоты волны  $h_b$ :

$$R_n = \frac{r_0}{\alpha} \sqrt[4]{(m-1)^2 (m^2-1) / 6 \ln m} \cdot i;$$

$$l_k = 0,5(0,87 - 0,16m)i / \sin \alpha;$$

Соотношения длин фактического и геометрического контактов в широком диапазоне обрабатываемых диаметров находятся в интервале 0,5..0,75, а высота внеконтактной волны вычисляется по формуле:

$$h_b = R_n (1 - \cos \theta_n). \quad (3)$$

В реальном процессе охватывающего деформирования пустотелого цилиндра параметр  $h_b$ , определяемый формулой (3), является мерой корсетности, образующейся при обработке и снижающей точность формы обработанной поверхности. Для повышения точности необходимо, чтобы размеры внеконтактного участка пластической деформации, расположенного за участком контакта, были минимальными, что возможно при условии:  $\lambda_\phi \leq \lambda_{\min}$ . Размеры внеконтактной волны могут быть оценены отношением фактического относительного натяга к минимальному, рассчитанному по формуле (1):

$$\theta_{нт} = \alpha (\lambda_\phi / \lambda_{\min}). \quad (4)$$

Для калибрующих зубьев из-за малости натяга допустимо принять значения  $\theta \approx 0$ ;  $h_b \approx 0$ .

#### **Выводы:**

1. По показателю пластичности металла соотношение главных напряжений при радиальном обжатии (схема сжатия) и дорновании (схема растяжения) редуцирование предпочтительнее.
2. Редуцирование способствует увеличению толщины стенки и уменьшению разностенности трубчатых заготовок, повышению их точности.

#### **Список использованных источников**

1. Исаев А.Н., Глушко Б.И. Моделирование геометрии очага деформации при осесимметричном охватывающем деформировании пустотелых заготовок/ Известия ОрелГТУ, 2008. – №3-4. – С. 55–58.
2. Зайдес С.А., Исаев А.Н. Механика поверхностно-пластического деформирования. Монография. LAP LAMBERT Publishing. – 2012. С. 413.
3. Исаев А.Н. Экспериментальные исследования процессов формообразования составных цилиндров методом дорнования /А.Н. Исаев, С.В. Власкин, М.Д. Гавриленко/ Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. тр. науч. симпозиума технологов-машиностроителей / Донской гос. техн. ун-т. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. С. 245-251.

Работа выполнена в рамках инициативной НИР.