

УДК 621.795

**Яворовский В. Н.
Корнийченко П. А.****ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ ДОРНОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
МИКРОСТРУКТУРЫ ПРИ ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

Главной проблемой процесса деформирующего протягивания (дорнования) является локальный характер деформаций, сосредоточенных на рабочем пояске инструмента-дорна (рис. 1). На заходном конусе 1 и цилиндрической его части 2 в предельных условиях контактного трения возникают местные пластические деформации, достигающие до 35...55 % на контактном пояске и падающие до нуля на наружной поверхности трубы. Во всех случаях в процессе дорнования используются наиболее эффективные комбинированные смазки, но обновляющаяся контактная поверхность трубчатой заготовки мало способствует снижению контактного трения, служащего одной из причин неравномерности деформаций. Да и вторая причина – неравномерность деформации по толщине стенки, являющаяся следствием самой природы плоской деформации, в этом случае должна быть тщательно исследована для нахождения энергосиловых параметров процесса.



Рис. 1. Дорн:

1 – заходный конус дорна; 2 – цилиндрический калибрующий поясок

В ходе исследований найдено, что, если удаётся осуществить дорнование цилиндрического отверстия в условиях плоского пластического деформирования (плоского дорнования), то, во-первых, этот процесс можно распространить на изготовление изделий неограниченной длины (трубы, стволы стрелкового оружия и пр.), и, во-вторых, качество и точность получившегося отверстия соответствует самым высоким требованиям качества: это точность 6 качества и прямолинейность оси отверстия в пределах допусков этого же качества и чистота поверхности, отвечающая чистоте $R_a 0,074...0,096$ при исходной, полученной развертыванием, $R_a 0,8...1,0$ [1, 2]. При этом в поверхностном слое, прилегающем к отверстию, возникают дополнительные напряжения сжатия, которые после снятия нагрузки превращаются в остаточные и способствуют увеличению долговечности изделия, нагруженного внутренним давлением, вызывающим напряжения растяжения в стенках трубы [3].

Для реализации режима плоского дорнования необходимо обеспечить малые диаметральные обжатия, которые подсчитываются, исходя из условия, чтобы деформация вдоль оси трубчатого изделия $\varepsilon_0 = 0$. Это возможно лишь в случае, если радиальное смещение металла от деформирующего пояска дорна, носящие локальный характер, распространяясь к наружной поверхности трубчатого изделия, уменьшились бы по величине, так что пластическая деформация вдоль радиуса постепенно переходила бы в упругую. Исходя из этого, для создания условий плоской деформации подсчитываются обжатия на диаметр, при которых выполнялось бы это условие. При расчете задается положение кольцевого слоя – границы перехода пластической деформации в упругую [4].

Для предмета исследований, – пистолетного ствола калибра 9 мм, – диаметральное обжатие в 3 сериях экспериментов равно 0,35; 0,45; 0,65 мм. При принятом диаметре отверстия и с учетом упругих деформаций, уменьшающих диаметр отверстий после дорнования, используются 3 заготовки с толщиной стенки 2,55...2,64 мм.

Если превысить наибольшее диаметральное обжатие (0,65 мм), то процесс деформации принимает объемный характер, что проявляется в появлении осевой деформации, $\varepsilon_0 \neq 0$. Из-за локального перемещающегося очага деформации далеко впереди инструмента-дорна движется накапливающийся валик металла, упрочняющийся с увеличением деформации. Когда длина изделия ограничивается величиной, при которой степень деформации вдоль оси не исчерпывает ресурс пластичности материала детали, тогда обработанная поверхность имеет высокое качество, но из-за неравномерной деформации в радиальном и осевом направлении плоские торцы заготовки преобразуются в конические криволинейные поверхности, которые должны быть удалены механической обработкой, для чего должен быть предусмотрен припуск [5].

Целью данного исследования является нахождение способов оценки силовых параметров (напряжений, усилий) дорнования в условиях плоской деформации, при этом определяются локальные перемещения для малых размеров очага деформации.

Для нахождения локальных деформаций такой величины используется метод подсчетов удлинения и сжатия зерен микроструктуры [6], вытягиваемых и обжимаемых при разных натягах дорнования.

Объектом изучения выбран пистолетный ствол калибра 9 мм, изготовленный из жаростойкой стали ферритного класса 14X17H2. Это исследование проведено на продольном разрезе заготовки в сборе с дорном [7, 8]. Определяются величины локальной деформации вблизи поверхности дорна и далее вдоль толщины стенки еще в 3 точках.

Деформированная часть ствола (со стороны фланца) и недеформированный конец проходят весь комплекс подготовительных работ с микрошлифами. Это, во-первых, запрессовка в бакелит для шлифования и полирования микрошлифов в нескольких режимах с использованием суспензии оксида кремния MASTERMET 2 с минимальным размером фракции зерна 3 мкм, (рис. 2). Эта тщательность позволяет иметь плоскостность шлифов до 0,001 мм.

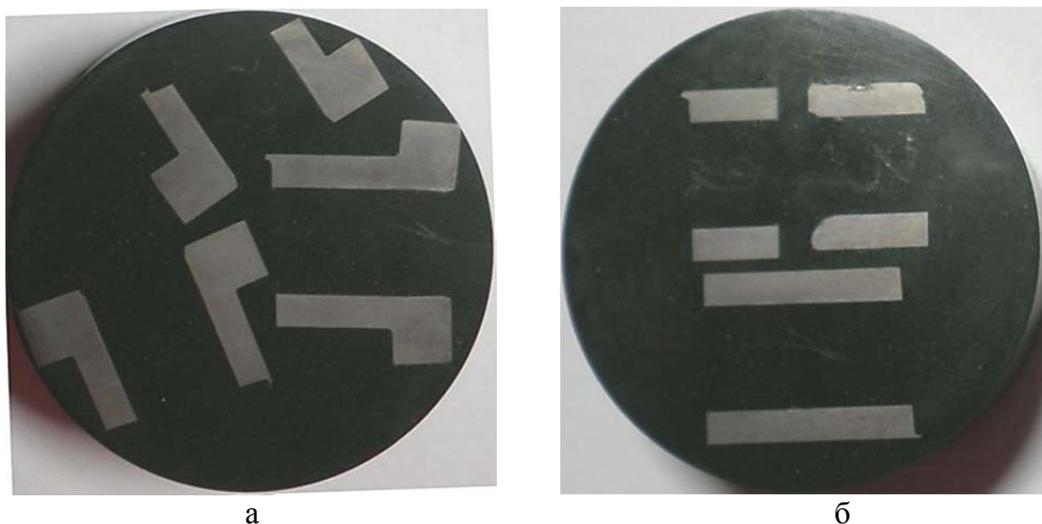
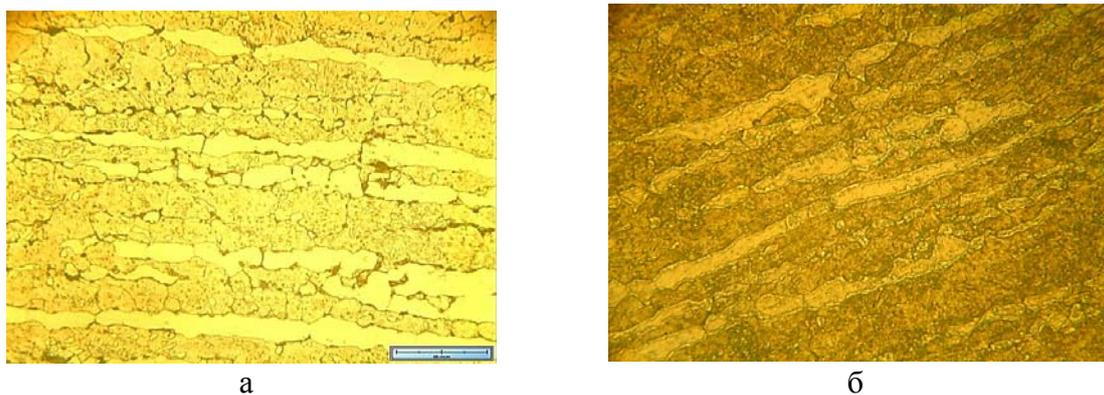


Рис. 2. Запрессованные в бакелит образцы:

а – образец после дорнования; б – недеформированный участок

Во-вторых, производится травление реагентом, содержащим 50 мл HCl, 3,5 мл HNO₃ и 50 мл H₂O, что позволяет четко выявить границы зерен. Эта очень ответственная операция дублируется во второй серии экспериментов травителем в составе 10 мл HCl, 20 мл CaSO₄ и 10 мл H₂O. Микрошлифы образцов после и до дорнования показаны на рис. 3. Выявленный размер зерен соответствует 7...8 баллу, т. е. он равен приблизительно 10^{-3} ... 10^{-4} мм.



а

б

Рис. 3. Микроструктура изделия в разных точках образцов для деформирующего протягивания с диаметральным обжатием 0,45 мм:

а – в точке, прилегающей к пояску дорна; б – в недеформированной зоне

Полученные микрофотографии обработаны с использованием программы SEO Image Lab v 1,0 с получением блокграмм распределения величины зерен как по площади, так и по наибольшей длине. С учетом мелкозернистости структуры численная обработка размеров зерен ведется как в соответствии с указанной программой, так и с использованием микроструктурного метода исследования конечных пластических деформаций [6].

Два метода обработки микроструктуры дают среднестатистические максимальные размеры зерен в недеформированном образце: $0,31 \times 0,002$ мм и $0,35 \times 0,002$ мм. Эти средние значения исходных длин зерен приняты в качестве l_0 при подсчете степеней деформации (1):

$$\varepsilon = \frac{\tilde{l} - \tilde{l}_0}{\tilde{l}_0}, \quad (1)$$

где \tilde{l} – среднестатистический наибольший размер зерна (его длина), получаемая при дорновании с разными натягами;

\tilde{l}_0 – среднестатистические значения наибольших размеров зерен до деформации.

При обработке результатов экспериментов главное внимание обращается наибольшим размерам зерен, так как они, по-видимому, в большей мере соответствуют главным деформациям растяжения отдельных зерен ε_l .

Кривые распределения локальной относительной деформации вдоль толщины стенки представлены на рис. 4 [7, 8].

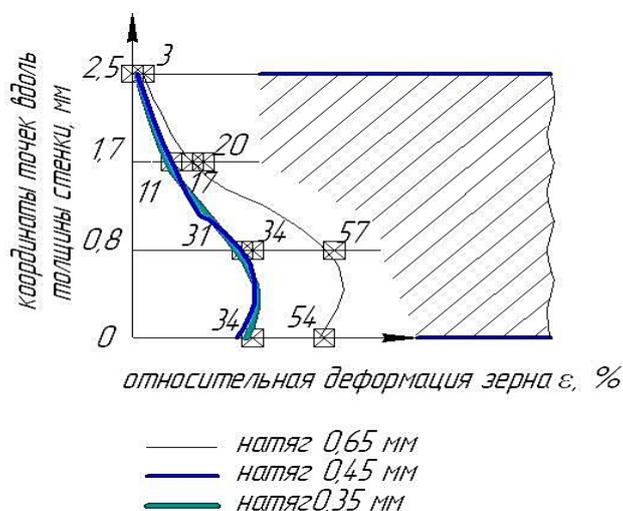


Рис. 4. Кривые распределения локальной относительной деформации вдоль толщины стенки с натягами дорнования 0,35; 0,45 и 0,65 мм на диаметр

Для расчетов напряжений и усилий дорнования найдены кривые упрочнения I и II рода для стали 14X17H2, представленные на рис. 5.

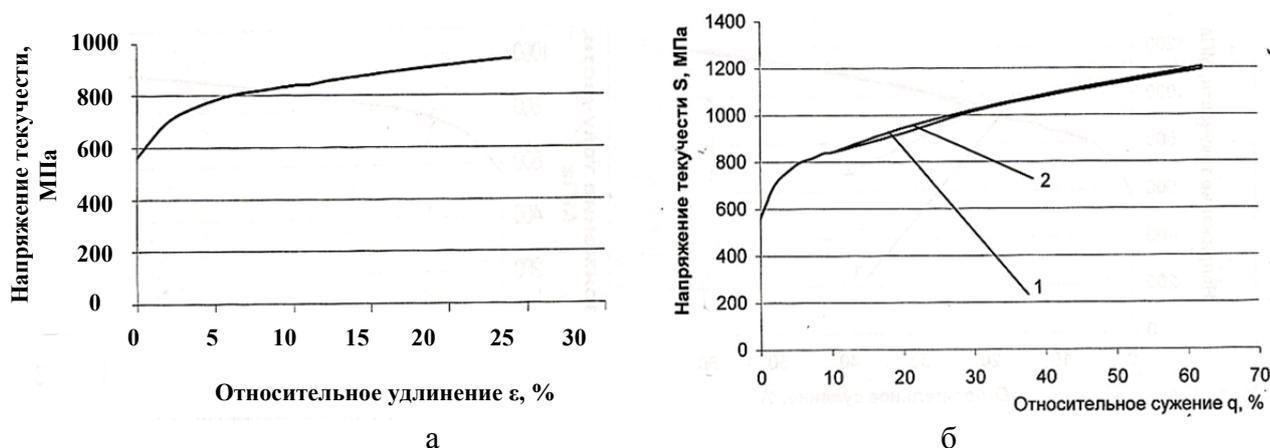


Рис. 5. Кривые упрочнения I и II рода для стали 14X17H2:
а – кривая упрочнения I рода; б – кривая упрочнения II рода

Обработка кривых распределения локальных деформаций и кривой упрочнения I рода даёт распределение напряжений в 4 точках по толщине стенки, представленное на рис. 6. Подсчитанные таким образом напряжения достаточно велики, особенно в слоях трубы, прилегающих к контактной поверхности инструмента-дорна, они быстро убывают в средних слоях, а на наружной поверхности принимают значение предела текучести.

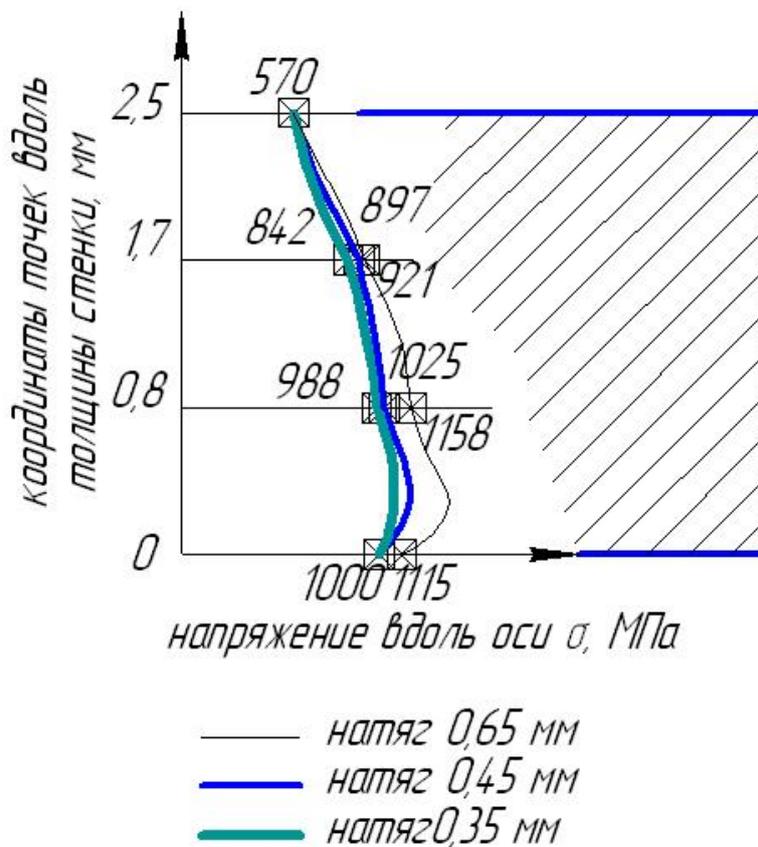


Рис. 6. Распределение напряжений в стенке трубчатого изделия при дорновании

Эти подсчитанные напряжения больше характеристики σ_e при растяжении и не вызывают разрушения лишь в случае объемного напряженного состояния со значительным влиянием сжимающих напряжений, что соответствует плоской деформации трубы. Из кривых на

рис. 6 видно, что наибольшие напряжения действуют на некотором удалении от поверхности контакта «трубчатое изделие – дорн», таким образом, контактное трение, тормозя пластическую деформацию, снижает упрочнение материала. Напряжения, найденные в данном исследовании, подтверждают результаты экспериментов (рис. 7) 2002 г. [2], когда при дорновании с диаметральной натягом 0,65 мм наблюдались микротрещины и расслоения поверхностного слоя порядка высоты микронеровностей обработки, т. е., в данном случае 0,09...0,1 мкм.

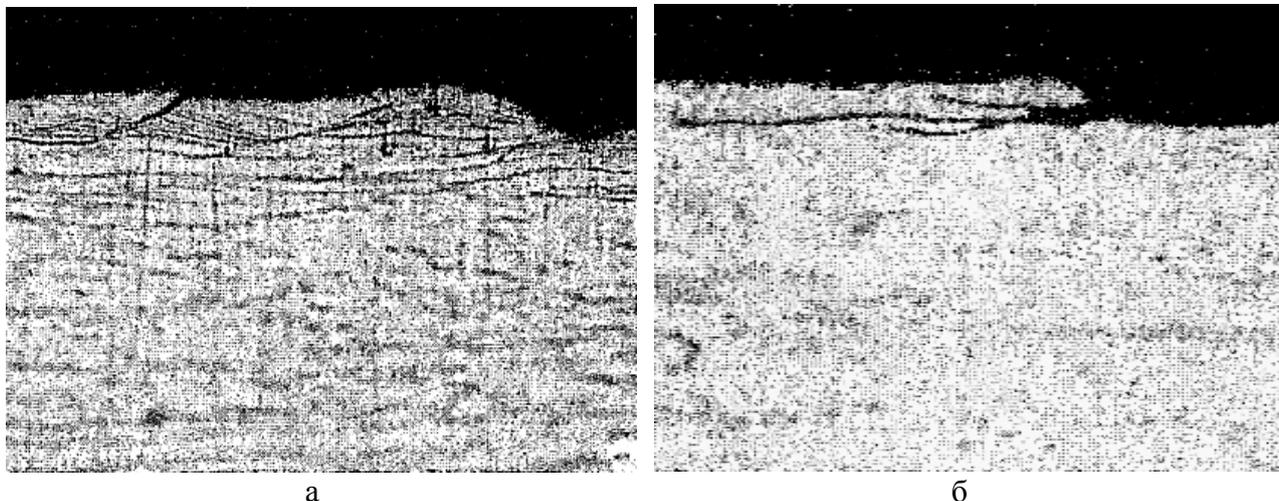


Рис. 7. Микротрещины на поверхности трубы, вызванные локальными напряжениями выше предела прочности:

а – характерное расположение дефектов в поверхностном слое ($\times 500$); б – особенности формы поверхностного дефекта ($\times 1000$)

Если известна функция:

$$S = S(\delta), \quad (2)$$

где S – напряжение текучести в МПа по переменной толщине стенки δ , то усилие дорнования в установившемся режиме плоской деформации определяется, как (3):

$$P = \int_F S(\delta) dF = 2\pi \int_{r_в}^{r_н} S(\delta) r dr, \quad (3)$$

где, кроме указанных символов, $r_н$ и $r_в$ – наружный и внутренний радиусы трубы.

Данный интеграл в общем случае не берется из-за неопределенности в математических терминах функции $S(\delta)$, равносильной функции $S(r - r_в)$ и данной лишь в аналоговой форме. Вместе с тем он представляет собой объем тела вращения, образованного вращением эпюры напряжений текучести $S(\delta)$ вокруг оси трубы и может быть найден по теореме Папруса – Гюльдена:

$$P = F \cdot 2\pi \cdot r_c \cdot k_s \cdot k_r, \quad (4)$$

где F – площадь эпюры напряжений текучести в МПа · м;

r_c – радиус от оси до центра тяжести площади эпюры, в м;

k_s и k_r – масштабы построения эпюры напряжений и линейных размеров.

Также интеграл может быть подсчитан по методу конечных разностей.

Производственные подсчеты показывают хорошую сходимость (до 15 %) результатов расчётов и экспериментальных кривых усилий дорнования, рис. 8 [1].

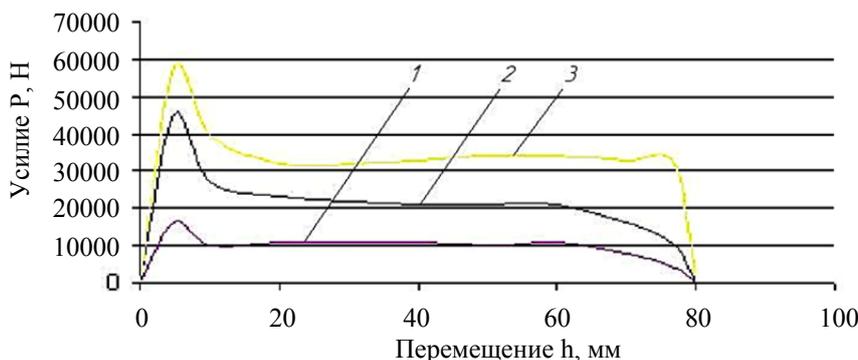


Рис. 8. Усилие процесса деформирующего протягивания при различном радиальном обжатии (1 – 0,35 мм; 2 – 0,45 мм; 3 – 0,65 мм)

ВЫВОДЫ

Найдено распределение напряжений в локальном очаге деформации при дорновании. Предварительно описанные деформации для разных натягов на диаметр 0,35; 0,45 и 0,65 мм [7] используются наряду с найденными кривыми упрочнения для стали 14X17H2 при подсчете указанных напряжений. Этот подсчет даёт объяснение появлению микротрещин и расслоений поверхностного слоя на глубину микронеровностей шероховатости напряжениями, близкими к пределу прочности. Усилие дорнования при установившемся процессе, исследованное экспериментально, также подтверждено расчетами. Все указанные выводы соответствуют лишь плоскому деформированию при малых натягах на диаметр.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яворовский В. Н. Качество отверстий у изделий большой длины, обработанных деформирующим протягиванием в условиях плоской деформации / В. Н. Яворовский, О. В. Герасимов, Ю. В. Хмара // *Технологические системы*. – 2002. – № 2. – С. 47–50.
2. Некоторые особенности формирования параметров качества отверстия при деформирующем протягивании / В. А. Титов, В. Н. Яворовский, И. Г. Лавренко, О. В. Герасимов // *Технологические системы*. – 2002. – № 5. – С. 31–36.
3. Яворовский В. Н. Оценка качества изделий большой длины, обработанных деформирующим протягиванием / В. Н. Яворовский, О. В. Герасимов, В. А. Титов // *Вестник НТУ Украины «Киевский политехнический институт»*. – 2005. – № 46. – С. 42–48.
4. Теоретическое исследование деформации толстостенной трубы большой длины деформирующим протягиванием небольшим радиальным обжатием / В. Н. Яворовский, О. В. Герасимов, Ю. В. Хмара, В. А. Титов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – Днепропетровск, 2002. – № 8–9. – С. 366–374.
5. Проскураков Ю. Г. Дорнование цилиндрических отверстий / Ю. Г. Проскураков. – М. – Свердловск : Машигиз, 1958. – 112 с.
6. Смирнов-Аляев Г. А. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением / Г. А. Смирнов-Аляев, В. П. Чикидовский. – Л. : Машиностроение, 1972. – 359 с.
7. Яворовский В. Н. Микроструктурные исследования локальных деформаций при дорновании в условиях плоского деформированного состояния / В. Н. Яворовский, П. А. Корнийченко // *Обработка металлов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 2(27). – С. 72–78.
8. Яворовский В. Н. Локальная деформация в поверхностных слоях на границе трубчатое изделие – дорн при деформирующем протягивании / В. Н. Яворовский, П. А. Корнийченко, А. В. Котеленец // *Вестник НТУ Украины «Киевский политехнический институт»*. – 2011. – № 63. – С. 224–229.

Яворовский В. Н. – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПИ»;

Корнийченко П. А. – аспирант НТУУ «КПИ».

НТУУ «КПИ» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев.

E-mail: k_OMD@ukr.net

Статья поступила в редакцию 16.05.2012 г.