

УДК 621. 795

Яворовский В. Н.  
Корнийченко П. А.**МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ДОРНОВАНИИ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОГО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

Микроструктурные исследования деформации в приконтактной зоне на границе инструмент-дорн – трубчатое изделие – это единственный способ определить деформации, а по ним и напряжения при пластическом протягивании изделий. Этот перспективный технологический процесс пока не получил должного распространения из-за сложности учета и описания именно локальных пластических деформаций, которые здесь и определяют успешность достигнутых результатов. Следует выделить две задачи, которые при этом решаются, первая – это получение качественного отверстия, имеющего высокую точность (6 квалитет) и малую шероховатость поверхности Ra 0,074...0,096 (то есть на уровне хонингования), а с учетом холодной пластической деформации всегда следует ожидать упрочнения поверхностного слоя и формирования остаточных напряжений. Если эти напряжения противодействуют напряжениям в изделии от действия рабочих нагрузок, тогда оно отвечает самым высоким стандартам качества [1–3].

Для второй задачи характерно получение не только высоких качественных характеристик внутреннего поверхностного слоя трубчатого изделия, но и формирование некоторого поперечного сечения полости, возможно и отличного от круга. В этом случае необходимы значительные перемещения металла в локальной зоне. Вторая задача может быть сведена к первой на последнем финишном переходе, если после многих переходов дорнования заготовка для него имела бы необходимую точность и чистоту поверхности предварительных переходов, а, главное, прошла бы достаточно скрупулезную термическую обработку, после которой ей бы возвратились исходные характеристики пластичности ( $d_{10}$ ,  $Y_{10}$ ,  $\frac{S_g}{S_T}$ ) и была

проработана мелкозернистая гомогенная структура.

Целью данного исследования является изучение пластической деформации зерен микроструктуры, вытягиваемых при разных натягах дорнования.

При решении первой задачи процесс следует проводить в условиях плоского деформирования трубчатого изделия дорном, что приводит к малым натягам деформирования, (разности диаметров заготовки и изделия за 1 переход). В этом случае отсутствует деформация металла в направлении оси изделия, а лишь в радиальном и окружном направлении. Исходя из условия, что  $\varepsilon_\theta > 0$ ;  $\varepsilon_r < 0$ ,  $\varepsilon_0 = 0$ , const, где  $\varepsilon_\theta$ ,  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_0$  – окружная, радиальная и осевая деформации, и для трубы, находящейся в упруго-пластическом состоянии деформации  $\varepsilon_\theta$  и  $\varepsilon_r$  можно представить с учетом оговорок, что отношение  $\frac{S_r}{S_q}$  и  $\frac{S_0}{S_q}$  остаются постоянными в любой момент пластической деформации, в виде (1) и (2), [4]:

$$e_r = -\frac{e_0}{2} - \frac{3C_2}{2\sqrt{2}r^2}; \quad (1)$$

$$e_q = -\frac{e_0}{2} + \frac{3C_2}{2\sqrt{2}r^2}, \quad (2)$$

где  $C_2$  – постоянная интегрирования, определяемая из граничных условий.

Видно, радиальная и окружная деформация быстро убывают с увеличением радиуса слоя  $r$ , при этом для применяемых в производстве натягов пластическая деформация постепенно переходит в упругую.

Итак, при деформирующем протягивании трубы всегда следует ожидать, что внутренние слои, прилегающие к стенкам отверстия, претерпевают пластическую деформацию, в то время как слои вблизи наружной поверхности находятся в упругом состоянии. Значит, для осуществления плоской деформации при локальном нагружении следует рассчитывать режимы, при которых осевая деформация постоянна и, в частности,  $e_0 = 0$ .

Исходя из этого, для создания условий плоской деформации подсчитываются обжатия на диаметр, при которых выполняется это условие. Здесь задается положение кольцеобразного слоя, где осуществляется переход от пластической деформации к упругой, [5]. Для конкретного случая, – пистолетного ствола калибра 9 мм, – диаметральное обжатие в 3 сериях экспериментов составляет 0,35; 0,45; 0,65 мм. При принятом диаметре отверстия тогда толщина стенки заготовки равна 2,55...2,64 мм.

Для второй задачи характерно объемное деформируемое состояние, здесь  $\varepsilon_\theta > 0$ ;  $\varepsilon_r < 0$  и  $\varepsilon_0 > 0$  или  $\varepsilon_0 < 0$ , где деформации  $\varepsilon_\theta$ ,  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_0$  – окружные, радиальные или осевые.

Если схема деформированного состояния объемная, то должна изменяться длина исходной заготовки (рис. 1), [6]. В этом случае далеко впереди инструмента-дорна перемещается пластическая волна деформируемого металла, (рис. 2). Если величина натяга на диаметр при деформирующем протягивании выбрана такой, что осевая деформация  $e_0 = f(l)$ , где  $l$  – длина пути дорна (то есть деформация переменна), то пластическая волна, представляющая кольцеобразный валик металла перед торцом инструмента-дорна, увеличивается в объеме.

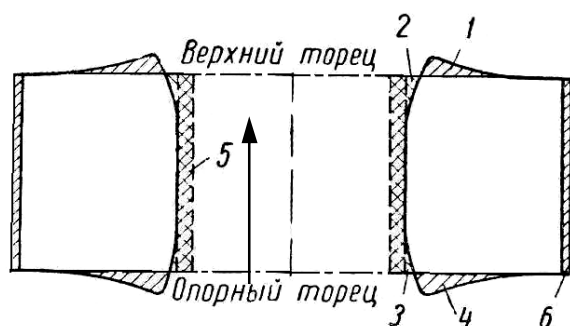


Рис. 1. Схема смещения металла по объему втулки при дорновании, [6]:

1, 4 – пластическая волна на верхнем и опорном торце; 2, 3 – утяжины цилиндрического отверстия у обоих торцов; 5 – пластическая деформация вдоль оси отверстия; 6 – пластически деформированный слой на наружной поверхности

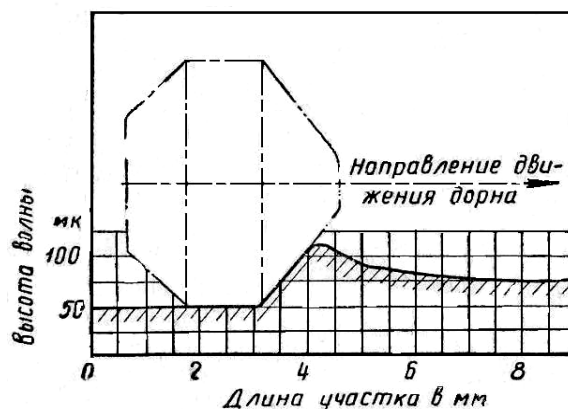


Рис. 2. Профиль пластической волны металла, получающейся при дорновании в отверстии, [6]

Постепенно растет средняя величина его пластической деформации с соответствующим упрочнением этого слоя и потерей его ресурса пластичности. Если длину заготовки ограничить длиной, в которой еще не исчерпывается ресурс пластичности, то пластическая волна выходит на торец заготовки, и форма изделия соответствует форме, изображенной на рис. 1. Это обычный вид изделий небольшой длины, полученных деформирующим протягиванием, где натяги на диаметр имеют значительную величину. Ясно, что короткие изделия следует механически обрабатывать по их торцам.

Если длина заготовки не ограничена (в 10, 100 раз больше диаметра отверстия), то накапливающаяся в валике металла пластическая деформация, ведет к исчерпанию пластических свойств, и в этих условиях происходит его разрушение или срезание с формованием стружки, [6]. Дальнейшее продолжение дорнования может привести к повторному, многократному или регулярному срезу валиков и формованию стружки вдоль оси изделия в зависимости от её длины. В этом случае, ни о какой точности или чистоте поверхности не может быть и речи.

Теоретические подсчеты натягов, при которых должна наблюдаться плоская деформация внутренних слоев металла, проверяются экспериментально, (рис. 3).

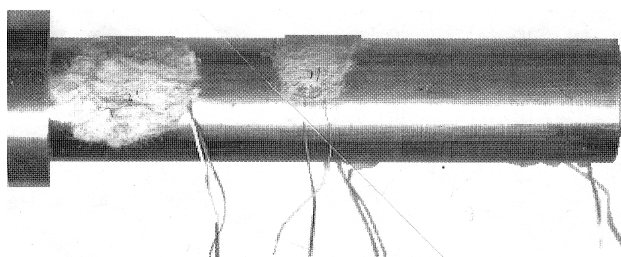


Рис. 3. Образец ствола с наклеенными вдоль оси и в осевом направлении датчиками

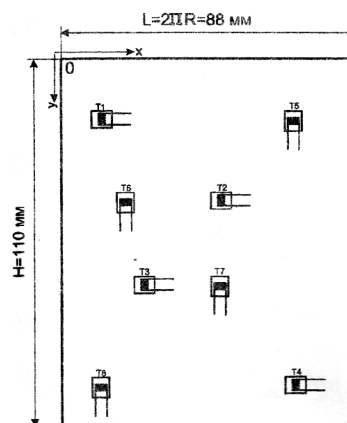


Рис. 4. Схема наклейки тензодатчиков (указана развертка наружной поверхности изделия)

Используемые для фиксирования осевых и окружных напряжений тензодатчики КФ-4 (база 4 мм) располагаются на наружной поверхности детали в соответствии со схемой наклейки датчиков, (рис. 4). На ней дана развертка наружной поверхности ствола с местами и направлением наклейки тензодатчиков. Координаты центров оснований датчиков даны в табл. 1.

Таблица 1

Координаты точек наклейки тензодатчиков

Координата	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>8</sub>
x	5	49	27	71	71	27	49	5
y	15	40	65	90	15	40	65	90

Как и следует ожидать, для плоской деформации кривые составляющих напряжений в осевом направлении должны быть одинаковы вдоль оси ствола, что видно из рис. 5, а также на кривой усилий дорнования в установившемся режиме [1].

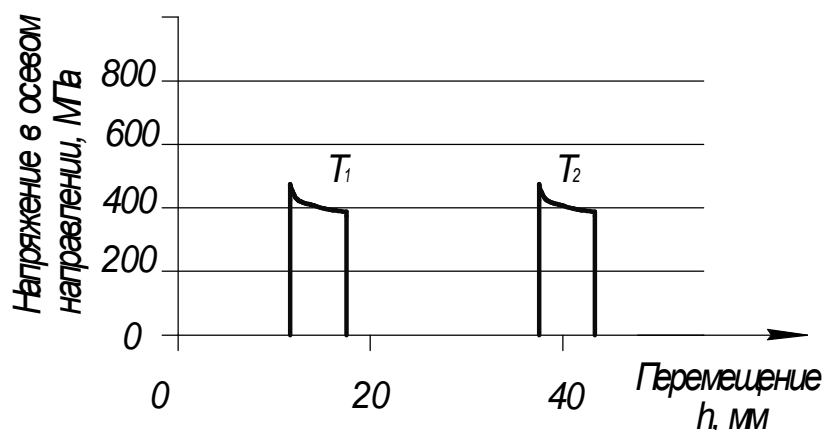


Рис. 5. Напряжения в осевом направлении, фиксируемые датчиками T<sub>1</sub> и T<sub>2</sub> на наружной поверхности

Наконец создание схемы плоской деформации подтверждается и продольным разрезом дорна и заготовки, полученным электроискровым способом и подготовленным для последующих металлографических исследований, (рис. 6). Однако создание условий плоской

деформации связано с намеренно вызванной неравномерной деформацией в окружном и радиальном направлениях. Эта неравномерность вызывает остаточные напряжения после завершения технологического процесса.

Изучение остаточных напряжений, [3], вдоль толщины стенки показывает, что при всех обжатиях на диаметр на внутренней поверхности трубы получены сжимающие остаточные напряжения. Окружные сжимающие остаточные напряжения создают благоприятные условия работы изделия при интенсивном нагружении его внутренним давлением.

Таким образом, неравномерность деформации при плоском деформированном состоянии даже еще улучшает качество изделия после дорнования. Однако, микрофотографии поверхности, полученные при наибольшем диаметральном обжатии 0,65 мм, свидетельствуют о том, что при установившемся деформирующем протягивании в контактном слое напряжения достигают предела прочности  $S_b$  и превышают его. Определение их в локальной области контакта невозможно из-за технических сложностей.

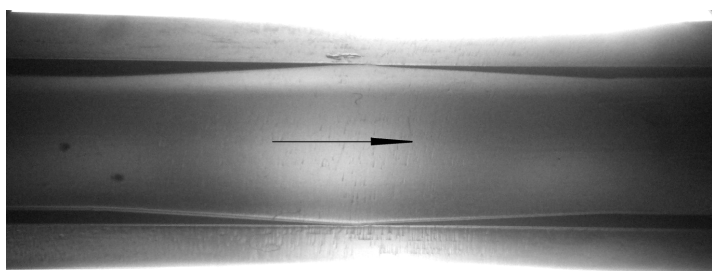


Рис. 6. Продольный разрез дорна и заготовки в процессе деформирующего протягивания для диаметального обжатия 0,45 мм

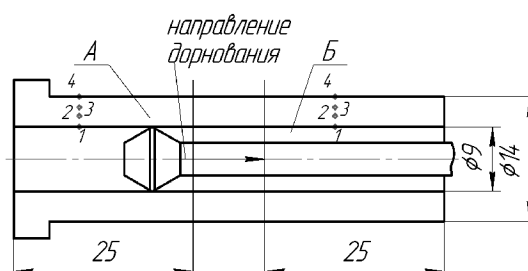


Рис. 7. Схема подготовки образцов для исследования микроструктуры

Поэтому для определения напряжений используется исследование деформации в области контакта инструмента и заготовки. Эта попытка предпринималась О. А. Розенбергом и др. [7], однако, количественные показатели относились к определению микротвердости ферритных зерен, а отсутствие сведений по кривым упрочнения не дают возможности определить соответствующую величину деформаций. Из-за небольшого размера очага деформации единственным способом изучения её величины в контактной зоне есть способ определения деформаций отдельных зерен по микроструктуре металла в контактной зоне после и до деформации.

Объектом исследования выбран пистолетный ствол калибра 9 мм, изготовленный из жаростойкой стали ферритного класса 14X17H2. На рис. 7 дан продольный разрез дорна и заготовки в процессе деформирующего протягивания, когда дорн находится на середине образца после прекращения процесса.

Определение величины локальных деформаций вблизи поверхности дорна и вдоль толщины стенки производится по длине зерен микроструктуры, приобретенной в результате холодной пластической деформации. Именно вытягивание и переориентировка зерен и образование текстуры позволяет после соответствующей обработки микроструктур определить величины деформаций и напряжений в рассматриваемых точках [8].

В деформированной зоне А (рис. 7) исследуется микроструктура в 4 точках расположенных в стенке между точками вблизи образующей отверстия и наружной поверхности. Для суждения об отклонениях в деформированной структуре по сравнению с исходной исследуется также микроструктура в недеформированной части трубы (зона Б).

Заготовка для дорнования – это горячекатаный пруток круглого сечения, изготовленный в соответствии с требованиями ГОСТ 2590-88, термообработанный. Кроме того, перед непосредственным дорнованием образцы отжигались при  $800^{\circ}\dots 850^{\circ}\text{C}$  с охлаждением вместе с печью. В результате горячей прокатки формируется полосчатая структура, вытянутые светлые полосы 1 которой видны на рис. 8. Полосчатая структура – это последствие

процесса рекристаллизации, при которой высокотемпературная фаза – легированный феррит выбирает центрами рекристаллизации вытянутые волокна аморфной примеси. При этом наблюдается волокнистая макроструктура и равноосная микроструктура – то есть волокно состоит из множества равноосных зерен феррита малой величины. Между светлыми полосами расположены более темные участки перлита 2. Полученный размер зерен соответствует 7...8 баллу зерна, то есть их размер соответствует  $10^{-3} \dots 10^{-4}$  мм.

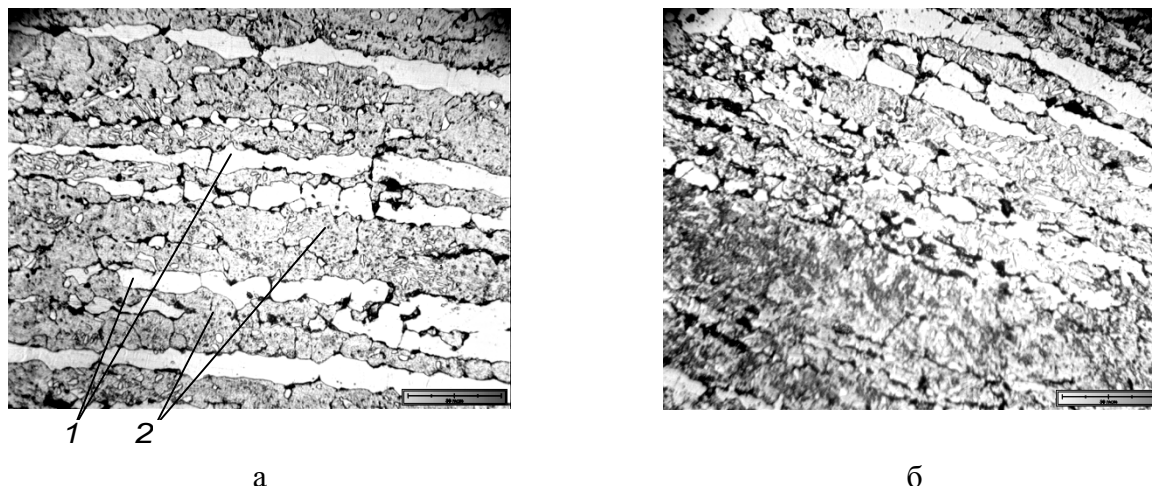


Рис. 8. Микроструктура изделия в различных точках образцов для деформирующего протягивания с диаметральной обжатием 0,45 мм:

а – в точке, прилегающей к пояску дорна; б – в недеформированной зоне; 1 – полосы (строчки) легированного феррита; 2 – мелкозернистый перлит

При исходной термической обработке этот материал имеет характеристики пластичности такие же, как и сталь 15 в исходном состоянии  $d_5 = 27 \%$  и  $y = 55 \%$ , это подтверждается и высокими показателями даже после закалки с  $1000 \dots 1030 \text{ } ^\circ\text{C}$ , с охлаждением в масле и высокотемпературном отпуске при  $620 \dots 660 \text{ } ^\circ\text{C}$  с охлаждением на воздухе,  $d_5 = 16 \%$  и  $y = 55 \%$  по ГОСТ 5949-75. С учетом объемного напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев деформация в  $55 \dots 60 \%$  вполне возможна.

Подготовленные для микроструктурных исследований шлифы были обработаны с использованием программы SEO Image Lab v 1,0, в результате чего получены блокogramмы распределения величины зерен как по площади, так и по наибольшей длине зерен (рис. 9–10).

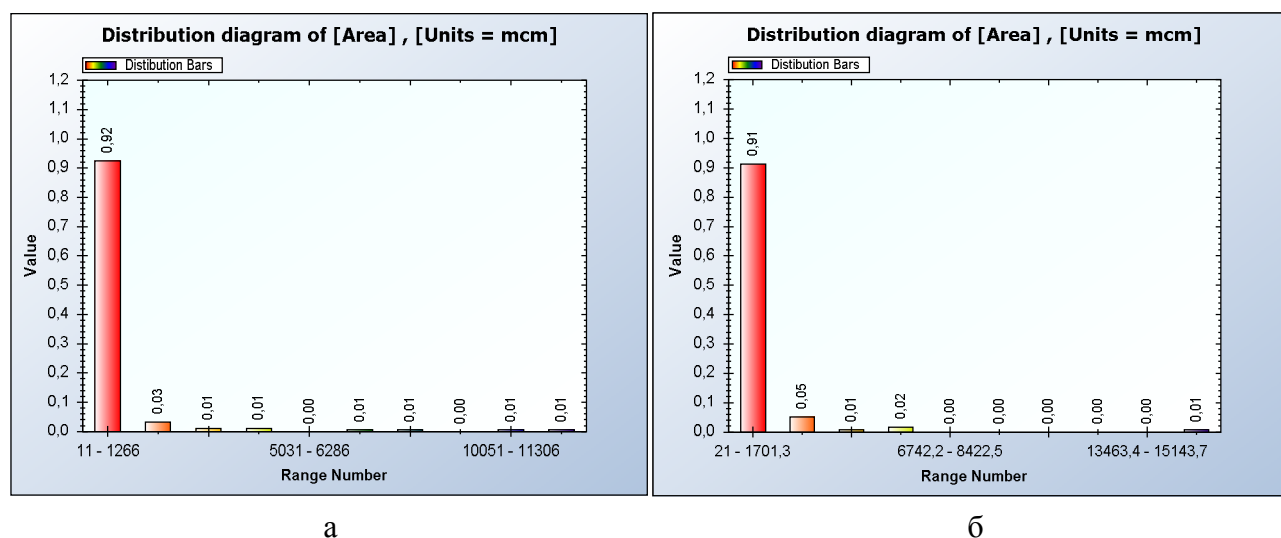


Рис. 9. Блокogramмы распределения зерен по площади: а – после деформации; б – до деформации

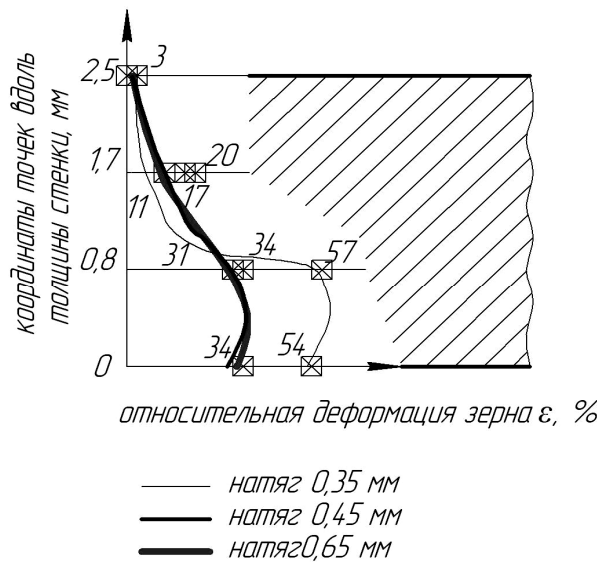
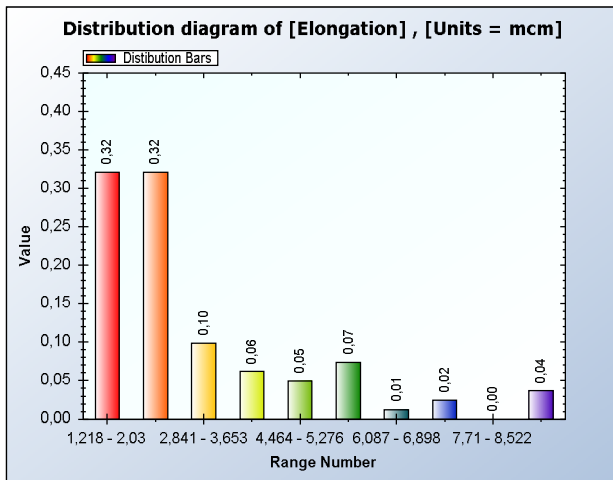
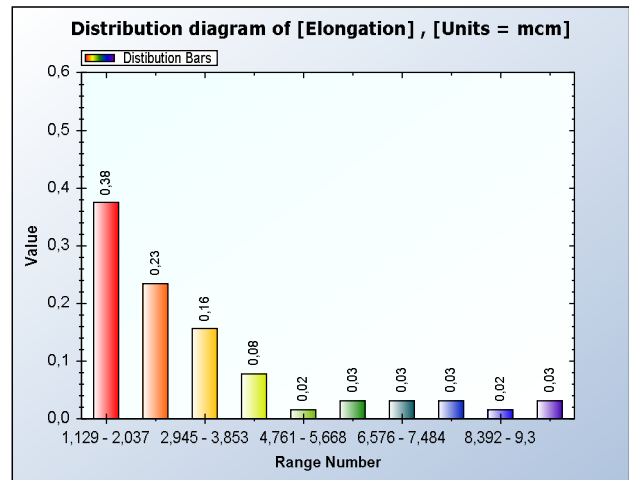


Рис. 11. Кривые распределения локальной относительной деформации вдоль толщины стенки с натягами дорнования: 0,35; 0,45 и 0,65 мм на диаметр

Обработка блокogramм распределения зерен по площади показывает, что зерна равновелики по площади до и после деформации, что соответствует закону постоянства объема при пластическом формоизменении, и поэтому не следует вводить вероятностных коэффициентов при расчетах удлинений зерен, оценивающих их произвольное сечение плоскостью поля обозрения.



а



б

Рис. 10. Блокogramмы распределения зерен по их наибольшему размеру в недеформированных образцах с натягом 0,65 мм: а – вблизи контактной поверхности; б – в центре образца

Подсчет средней величины длин зерна по блокogramмам на участках недеформированной структуры показывает, что оно равно в одной серии экспериментов  $0,31 \times 2 \cdot 10^{-3}$  мм, а в другой  $0,35 \times 2 \cdot 10^{-3}$  мм, как это видно на рис. 10. Эти средние значения исходных длин зерен и приняты в качестве  $\tilde{l}_0$  при подсчетах степеней деформации  $e = \frac{\tilde{l} - \tilde{l}_0}{\tilde{l}_0}$ , где  $\tilde{l}$  – среднестатистический наибольший размер зерна (его длина), получаемый при дорновании с разными натягами,  $\tilde{l}_0$  – среднестатистические значения наибольших размеров зерен, найденных выше.

Подсчитанные таким образом степени деформации вдоль толщины стенки, как и ожидалось, оказываются достаточно велики, вблизи предельных значений характеристик пластичности, (рис. 11).

Расчеты деформаций показывают их значительную величину в приконтактном слое, которая затем быстро убывает в середине образца и на наружной поверхности.

Такие величины деформаций возможны без разрушения лишь в случае, если имеет место объемная схема напряженного состояния со значительным влиянием сжимающих напряжений, что соответствует плоской деформации трубы. Из кривых видно, что наибольшие значения деформации в разных режимах достигаются на некотором удалении от поверхности контакта трубчатое изделие-дорн, что объясняется влиянием контактного трения, затрудняющего деформацию в месте контакта. Наибольшие локальные деформации наблюдаются в данных экспериментах при наименьших натягах – этим и объясняется наибольшие выглаживающие действия инструмента и наименьшая шероховатость полученной поверхности при натягах 0,35 мм.

## ВЫВОДЫ

В исследовании найдены деформации в локальном очаге дорнования на границе трубчатое изделие-дорн для разных натягов деформирующего протягивания. Данные результаты соответствуют лишь плоскому деформированному состоянию в условиях небольших натягов на диаметр. Наибольшие деформации в приконтактном слое соответствуют меньшим натягам. Степени деформации достигают своих предельных характеристик пластичности в условиях объемного напряженного состояния.

## ЛИТЕРАТУРА

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. – Киев, 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. – Киев, 2002. – № 5. – С. 31–36.
3. Яворовский В. Н. Оценка качества изделий большой длины, обработанных деформирующим протягиванием / В. Н. Яворовский, О. В. Герасимов, А. В. Титов // Вестник НТУ Украины «Киевский политехнический институт». – Киев, 2005. – № 46. – С. 42–48.
4. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел / А. Надаи. – М.: Изд. иностранной литературы, 1954. – С. 493–541.
5. 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.
6. Проскуряков Ю. Г. Дорнование цилиндрических отверстий / Ю. Г. Проскуряков. – Москва – Свердловск: Машиз, 1958. – С. 17–26.
7. Качество поверхности, обработанной деформирующим протягиванием / А. М. Розенберг, О. А. Розенберг, Э. И. Грищенко, Э. К. Посвятенко. – Киев: Наукова думка, 1977. – С. 28–37.
8. Смирнов-Аляев Г. А. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением / Г. А. Смирнов-Аляев, В. П. Чикидовский. – Л.: Машиностроение, 1972. – С. 211–242.

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

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

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

E-mail: [k\\_OMD@ukr.net](mailto:k_OMD@ukr.net)