

---

---

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТОК ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДОРНОВАНОГО ОТВЕРСТИЯ

А.С. Кошеленко, О.В. Жедь,

Солис Пинарготе Нестор Вашингтон

Российский университет дружбы народов

*ул. Миклухо-Маклая, 10а, Москва, Россия, 117198*

Исследовался процесс дорнования цилиндрического отверстия многозубым дорном. Характер изменения текстуры волокон металла поверхностного слоя в диаметральном продольном сечении цилиндрического отверстия сборной втулки изучался при помощи метода делительных сеток. Полученное искажение делительной сетки и сравнение с исходными ее параметрами позволило установить характер и глубину упругопластических деформаций.

**Ключевые слова:** дорнование, дорн, делительная сетка, упругопластические деформации.

Объектом исследования в работе является дорнование цилиндрического отверстия многозубым дорном. Методом делительных сеток изучалось деформированное состояние металла в сечении, совпадающем с осью дорнованного отверстия сборной втулки. Выбор методики исследования диктовался поставленной целью: изучить сложный характер изменения текстуры волокон металла поверхностного слоя цилиндрического отверстия в области максимальных деформаций при его перемещении относительно дорна.

Конструкция исследуемого образца втулки должна была обеспечить исследователю возможность получения полной информации о состоянии поверхностного слоя его сечения в радиальном направлении. Для этого заготовка будущей детали была разрезана до начального этапа изготовления в ней отверстия. С этой целью рассмотрено несколько конструкций. Одно из возможных решений представляет стандартный вариант дорнования в обойме, при котором заготовка-втулка предварительно разрезана вдоль продольной оси на две одинаковые части и плотно зажата в обойме. Однако этот вариант является неудачным из-за большой трудоемкости изготовления образца.

В работе был реализован вариант конструкции, который состоял из двух брусьев стали, предварительно обработанных по плоскости разъема, плотно стянутых болтами после позиционирования относительно друг друга двумя коническими штифтами. Таким образом, исследуемый образец должен быть сборным, состоять из двух половинок с сечением диаметральной плоскостью вдоль оси отверстия детали. Плоскости разъема такой сборной детали предварительно шлифовались, а затем притирались, что позволило обеспечить высокую жесткость стыка половинок. Кроме того, на хорошо обработанную плоскость разъема проще нанести царапанием делительную сетку на тот участок поверхности, где ожидаются максимальные деформации в результате дорнования отверстия. Отверстие под дорнование в сборной конструкции предварительно сверлилось с расположением его оси в плоскости разъема между стяжными болтами перпендикулярно его верхней торцовой плоскости. Затем отверстие развертывалось цилиндрической разверткой, размер которой подбирался с учетом размера дорна и величины прогнозируемого натяга между дорном и исходным отверстием.

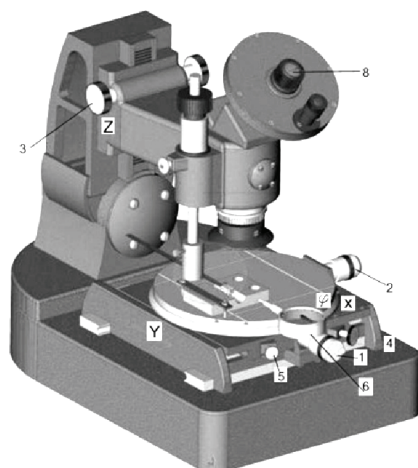
### **Методика исследования деформированного состояния методом делительных сеток**

Прямоугольная координатная сетка наносилась гравировальной фрезой на плоскость разъема обеих половинок сборной конструкции, установленной на столе микроскопа БМИ. Сетка наносилась с шагом 0,3 мм вдоль и перпендикулярно оси отверстия в непосредственной близости к краю дорнуемого отверстия. Половинка исследуемой детали предварительно выверялась относительно положения вершины фрезы. Выверка плоскости разъема исследуемой детали на столе микроскопа сводилась к обеспечению комплекта баз, состоящего из установочной и направляющей баз. Установочная база — это сама плоскость разъема конструкции, которую следовало совместить со скрытой плоскостью, в которой перемещается вершина лезвия фрезы. Одновременно эта плоскость параллельна плоскости стола микроскопа. Следующий этап по ориентированию — обеспечение направляющей базы, которая принадлежит образующей отверстия в плоскости разъема и должна совпадать с траекторией перемещения стола микроскопа. Выполнение этого требования необходимо для того, чтобы продольные линии сетки были параллельны образующей исследуемого отверстия.

Выверка положения детали производилась с помощью индикатора часового типа 6, закрепленного в державке (рис. 1). Ножка индикатора подводилась к детали до касания с ней, после чего стол с деталью перемещался с помощью маховичков микроскопа 1 и 2 по координатным плоскостям X и Y будущей сетки. По мере перемещения стола с деталью стрелка индикатора перемещалась на определенную величину, характеризуя положение детали относительно иглы. Регулируя угол поворота стола микроскопа маховичком 4 и отслеживая поворот детали по индикатору, выполняли выверку детали относительно следа вершины гравировальной фрезы. Усилие прижима фрезы и, как следствие, усилие с которым наносилась сетка, изменялось за счет жесткости плоской пружины, на которой крепится фреза. Гравировальная фреза крепилась в специальном сухаре, который устанавливался на конце плоской пружины и закреплялся с помощью винта. Усилие прижима фрезы также можно регулировать с помощью перемещения суппорта микроскопа по оси Z маховичком 3, создавая натяг между поверхностью детали и вершиной фрезы. Жесткость пружины также регулируется величиной ее вылета от заделки. После выверки детали наносилась сетка. Отслеживание параллельности и четкости линий происходило с помощью окуляра микроскопа.

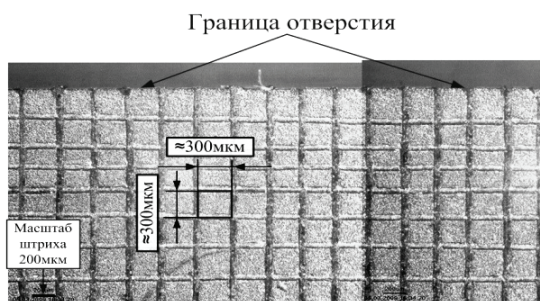
Полученная делительная сетка изображена на рис. 2. Деталь с нанесенной сеткой устанавливалась на стол микроскопа и фотографировались отдельные ее участки с четырехкратным увеличением. Затем несколько фотографий совмещались в программе Microsoft VISIO. На представленном фрагменте видны линии сетки с шагом 0,3 мм, т.е. 300 мкм. Относительную параллельность и перпендикулярность соответствующих линий сетки достичь удалось.

При выполнении натурного эксперимента необходимо было создать значительную степень деформации, которая может быть обеспечена большим натягом. Поэтому был выбран натяг, равный 0,57 мм. Размеры инструмента (дорна), а также график изменения диаметров его зубьев представлены на рис. 3.



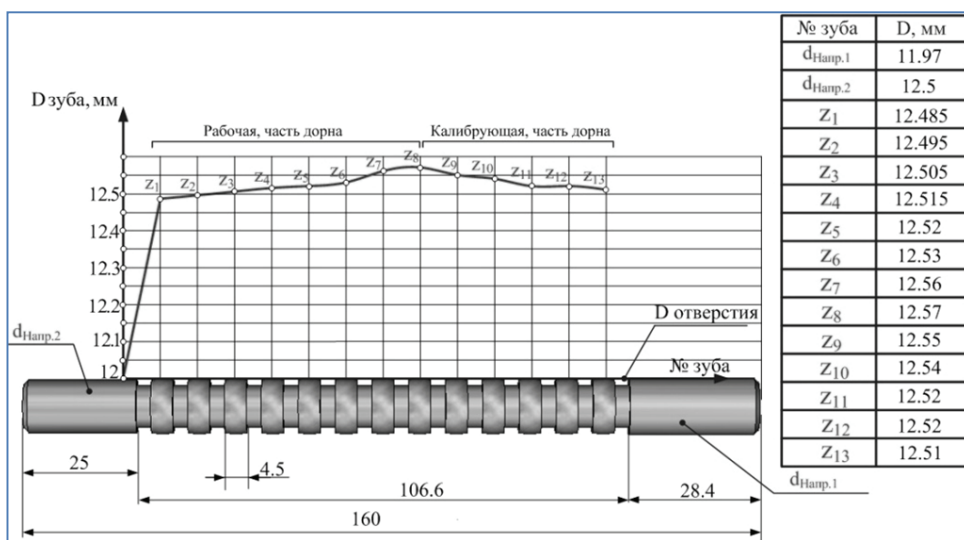
**Рис. 1.** Нанесение координатной сетки на микроскопе БМИ:

1 — маховичок для перемещения стола по оси Y; 2 — маховичок для перемещения стола по оси X; 3 — маховичок для перемещени окуляра микроскопа по оси Z; 4 — поворот стола на заданный угол φ; 5 — стоп стола; 6 — индикатор часового типа; 7 — способ крепления гравировальной фрезы на микроскопе; 8 — окуляр микроскопа



**Рис. 2.** Фото делительной сетки, нанесенной в плоскости разреза исследуемой детали на границе дорнуемого отверстия; снято на микроскопе с увеличением в четыре раза.

Масштаб фото произвольный



**Рис. 3.** Параметры дорна в эксперименте

Диаметр развернутого отверстия 12 мм, диаметр первого зуба дорна — 12,485 мм. Абсолютный натяг дорнования определяется по формуле

$$i = d_d - d \text{ мм,}$$

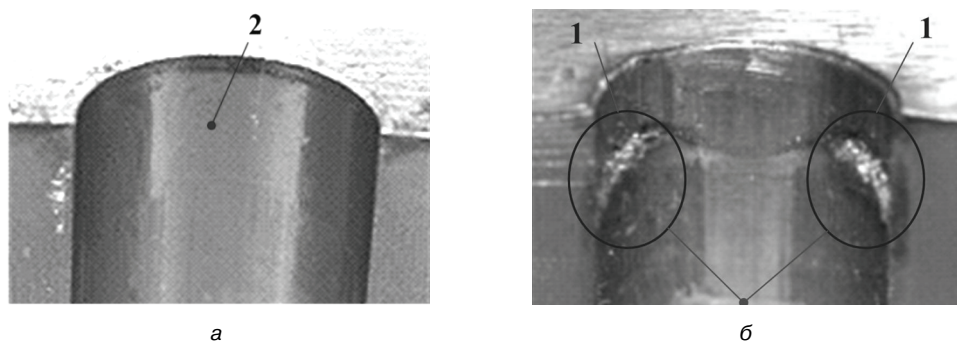
где  $d_d$  — максимальный диаметр зуба дорна;  $d$  — исходный (после развертки) диаметр дорнуемого отверстия.

Можно рассчитать абсолютный диаметральный  $i_0$  и максимальный относительный натяги  $\lambda$  в выполняемом эксперименте:

$$i_0 = 12,57 - 12 = 0,57, \text{ мм — абсолютный диаметральный натяг;}$$

$\lambda = 0,57 / 12 \cdot 100\% = 4,75\%$  — максимальный относительный натяг в эксперименте.

Большой натяг был выбран с целью обеспечить значительные деформации координатной секи. При установке дорна в отверстие конструкции направляющая инструмента, имеющая  $d = 11,97$  мм, свободно ориентировалась в нем, «закусив» первый зуб дорна. При продавливании штоком прессы происходили значительные вибрации технологической системы, связанные с большим натягом между дорном и дорнуемым отверстием, а также ступенчатым изменением осевой силы дорнования. После обработки конструкцию разобрали. Визуальный осмотр обработанного отверстия и зубьев дорна позволил выявить волны пластически деформированного слоя металла поверхности дорнуемого отверстия. Гребень этой волны направлен в сторону выходного отверстия, т.е. его направление совпадает с вектором скорости дорна (рис. 4).

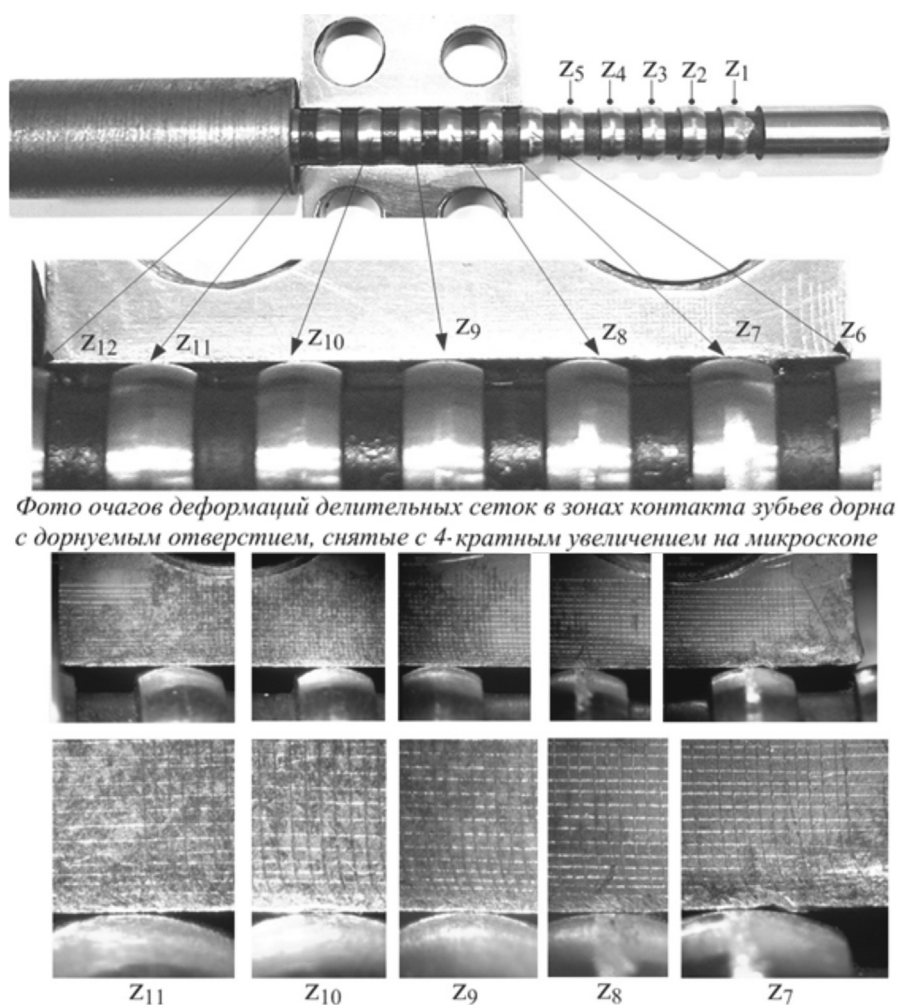


**Рис. 4.** Макрогеометрия дорнованого отверстия:

*a* — локальный участок отверстия со стороны входа дорна; *б* — локальный участок отверстия со стороны выхода дорна; 1 — гребень волны пластически деформированного слоя, перемещающегося в направлении вектора скорости процесса дорнования; 2 — участок поверхности правильной геометрической формы без видимых следов отклонения макрогеометрических параметров отверстия

Данный эксперимент не позволяет утверждать, какой формы и размера получился бы наплыв металла на свободном торце в направлении распространения пластически деформированного слоя, так как процесс дорнования был принудительно остановлен. Он не был доведен до окончательной обработки всей поверхности отверстия. Получены участки деформированного отверстия вдоль образующей в плоскости разреза с шагом равным шагу зубьев дорна и соответственно отличающимся по параметрам качества поверхностного слоя. Очагами деформаций на этих

участках являются зоны контакта рабочих поверхностей зубьев дорна с обрабатываемым отверстием вдоль его оси на момент остановки процесса дорнования. Этот этап натурного эксперимента показан на рис. 5. На комбинированной фотографии представлены фрагменты относительного положения зубьев дорна и дорнуемого отверстия на момент остановки процесса обработки, снятые цифровой камерой, а также локальные зоны очагов деформации с координатной делительной сеткой, снятые на микроскопе при значительном увеличении (X4).



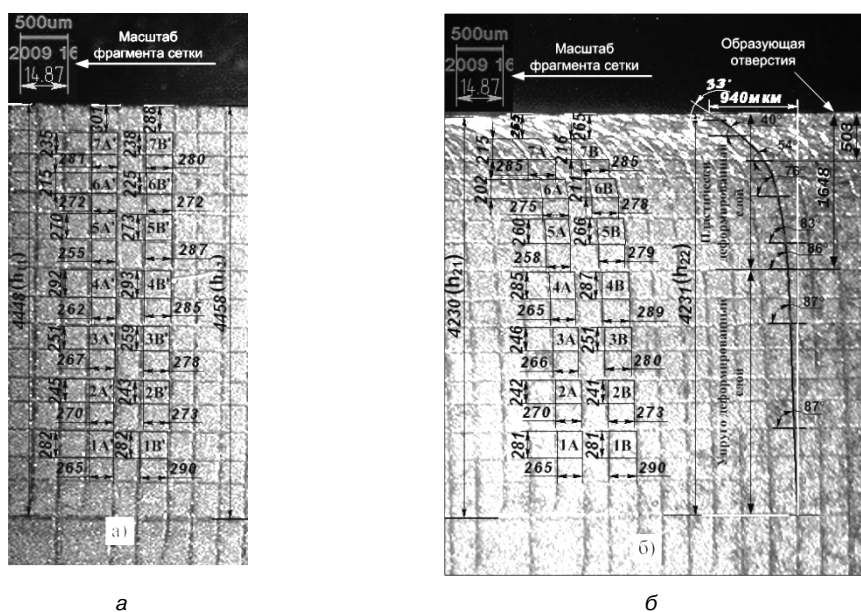
**Рис. 5.** Относительное положение зубьев дорна в отверстии на момент остановки процесса обработки

### **Методика обработки экспериментальных данных, полученных методом координатной сетки**

Для сравнительной оценки состоявшихся деформаций координатной сетки были выбраны ее идентичные фрагменты до и после дорнования (рис. 6).

На рис. 6 а приведены параметры ячеек координатной сетки до дорнования, а на рис. 6 б приведены те же ячейки координатной сетки, подвергнутые сдвиговым

деформациям в результате обработки дорном. Предварительная обработка полученных искажений координатной сетки и относительное сравнение ее параметров с исходными размерами ячеек позволяет установить глубину распространения упруго-пластических деформаций. Градиент изменения сдвиговых деформаций позволяет дифференциально выявить глубину проникновения в тело образца пластических деформаций. Наибольшие пластические деформации имеют место на контуре отверстия.



**Рис. 6.** Фрагменты координатной сетки:

а — до дорнования; б — после дорнования; 1А'—7А' и 1В'—7В' номера ячеек сетки с размерами их ребер, в мкм до дорнования; 1А—7А и 1В—7В номера тех же ячеек сетки с размерами их ребер, в мкм после дорнования

Графическая зависимость упругопластических деформаций приведена на рис. 6 б. Участок этой кривой, который начинается на глубине  $h_{22} = 4231$  мкм, плавно изменяется, подчиняясь линейному закону, до глубины 1648 мкм. На этом участке угол наклона кривой по отношению к образующей отверстия  $\geq 86^\circ$ , т.е. наблюдается малый градиент сдвиговых деформаций по толщине слоя. В дальнейшем с глубины 1648 мкм по мере приближения к образующей отверстия наблюдается резкое увеличение сдвиговых деформаций координатной сетки и ее графическая зависимость принимает нелинейный характер. На контур отверстия кривая, характеризующая сдвиговые деформации, выходит под углом  $33^\circ$ . Линейное перемещение периферийных точек образующей отверстия в направлении вектора скорости инструмента (дорна) составляет на рассматриваемом участке 940 мкм. В радиальном направлении по отношению к образующей отверстия также произошли значительные пластические деформации. Величина этих изменений перед рассматриваемыми ячейками столбца 1А'—7А' «до» и столбца 1А—7А «после» составляет (на сторону  $\times 2$ ):  $\Delta h_A = h_{11} - h_{21} = 4448 - 4230 = 218$  (мкм). Со стороны столбца 1В'—7В' «до» и столбца 1В—7В «после» составляет:  $\Delta h_B = h_{12} - h_{22} = 4458 - 4231 = 227$  (мкм).

Глубина деформированного слоя от образующей отверстия в тело образца, где наблюдается нелинейная зависимость сдвиговых деформаций, является пластической зоной деформации. Слой, расположенный между  $h_{22} = 4231$  мкм и  $h_{пл} = 1648$  мкм, на котором сдвиговые деформации подчиняются линейному закону, следует принять как упруго-деформированный. Количественную оценку состоявшихся деформаций можно определить аналитически по относительным параметрам искажений формы и местоположения начальных и текущих размеров идентичных ячеек координатной сетки.

Но прежде проведем простое числовое исследование координатной сетки. Для этого выберем два фрагмента одного и того же участка координатной сетки «до» (см. рис. 6 а) и «после» деформации (рис. 6 б). Измерения ячеек сетки выполнялись по фотографиям данных фрагментов с помощью программы T-Flex CAD. Был выбран участок сетки, расположенный непосредственно после прохождения зуба дорна наибольшего диаметра Z8. Масштаб фрагментов вычислялся методом пропорций с учетом фактического значения эталонной величины 500 мкм объект-микрометра. Данные размеров ячеек сведены в таблицу.

Таблица

Значения размеров ячеек (мкм)

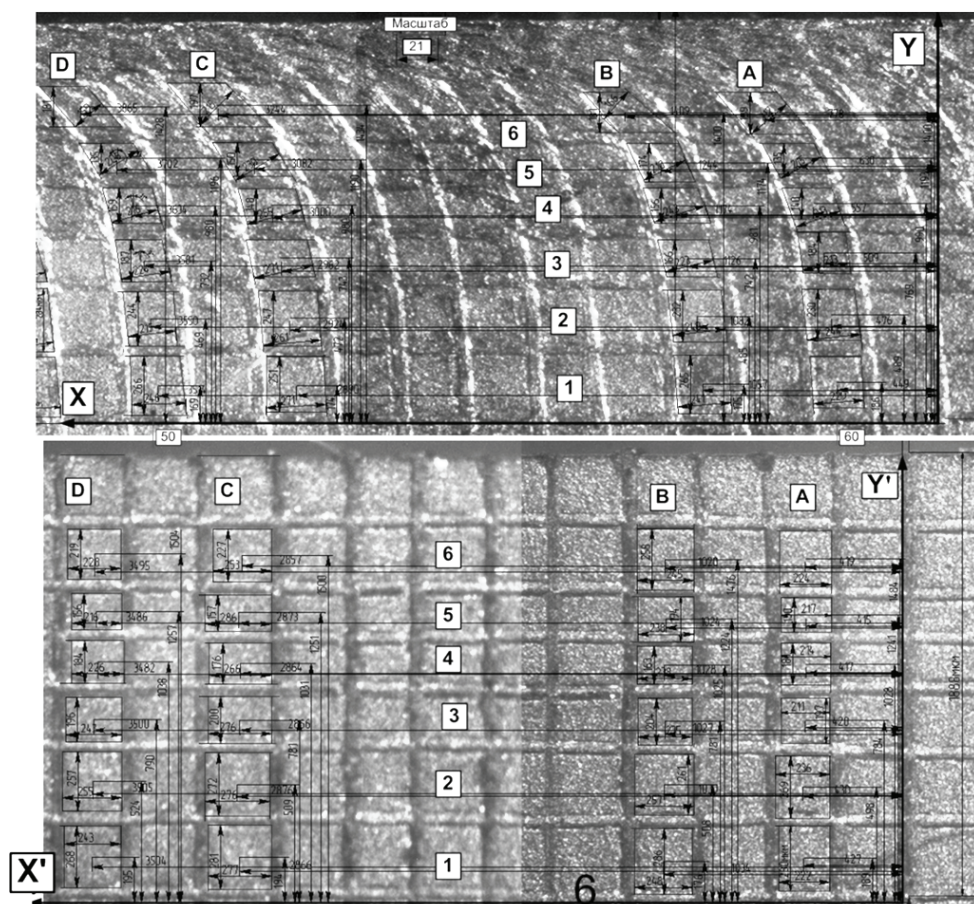
Размеры ячеек до обработки						Размеры ячеек после обработки					
1-ый столбик			2-ой столбик			1-ый столбик			2-ой столбик		
ось ячейка	по X	по Y	ось ячейка	по X	по Y	ось ячейка	по X	по Y	ось ячейка	по X	по Y
7A'	281	235	7B'	280	238	7A	285	215	7B	285	216
6A'	272	215	6B'	272	225	6A	275	202	6B	278	211
5A'	255	270	5B'	287	273	5A	258	260	5B	279	266
4A'	262	292	4B'	285	293	4A	265	285	4B	289	287
3A'	267	251	3B'	278	259	3A	266	246	3B	280	251
2A'	270	245	2B'	273	243	2A	270	242	2B	273	241
1A'	265	282	1B'	290	282	1A	265	281	1B	290	281

Из таблицы видно, что ячейки № 1 наиболее удаленные от отверстия вглубь тела образца испытали минимальную деформацию. Отличие в размерах ребер этих ячеек в радиальном направлении до и после дорнования составляет 1 мкм, что по существу следует отнести к ошибке измерения и принимать эти крайние ячейки как границу, до которой распространялась упругая деформация. По мере перемещения к отверстию искажения размеров ячеек возрастают. Так на уровне ячеек № 4 в столбце А-А' ребро ячейки в радиальном направлении уменьшилось на 7 мкм, а в столбце В-В' на 6 мкм. В продольном направлении эти ячейки увеличились соответственно на 3 и 4 мкм. Изменилась исходная геометрия ячейки, квадрат которой принимает форму ромба, т.е. наблюдается деформации сдвига. На уровне 4-х ячеек сдвиговые деформации не превышают  $4^\circ$  от исходного вертикального положения ребра ячейки. Но уже после ячейки № 4 в направлении к границе отвер-

ствия деформации ячеек становятся значительными и деформация сдвига не может быть аппроксимирована линейной зависимостью. Этот слой с уровня ячеек № 4 до границы дорнованного отверстия является пластически деформированным.

### Методология определения этапных значений смещений ячеек деформированной сетки

Для выполнения этого этапа исследования необходимо зафиксировать очаг деформации в стационарной фазе обработки. В этом случае картину накопления деформаций можно получить измерением сетки одного кадра очага деформации, зафиксированного в любой момент времени. Для этого на обработанном фрагменте сетки поместим неподвижную систему координат  $X'Y'$  (рис. 7), а на не обработанном — неподвижную систему  $XY$ .



**Рис. 7.** Замеры значений этапных смещений координатной сетки:

B, C, D — столбики ячеек; 2, 3, 4, 5, 6 — номера ячеек в столбце;  $XY$  — система координат для ячеек прошедших обработку;  $X'Y'$  — система координат для ячеек до обработки

Условие стационарности требует, чтобы картина искаженной координатной сетки относительно  $X'Y'$  не изменялась со временем. Любая элементарная ячейка сетки при движении инструмента будет захватываться очагом деформации и зани-



мать в нем последовательные промежуточные положения. Метод определения этапных смещений заключается в сравнении координат центров ячеек до и после обработки, и геометрических размеров ячеек также до и после обработки. Данные измерения производили с помощью программы T-Flex CAD по фотографиям координатной сетки, полученным на микроскопе (рис. 7).

Находили координаты центров ячейки до обработки  $X_k$  и  $Y_k$  и координаты центров той же самой ячейки  $X_{k+1}$  и  $Y_{k+1}$  после обработки, также геометрические размеры ячеек  $a_0, b_0$  — до обработки и  $a, b$  — после обработки. Эти данные обрабатывались по методике, изложенной в работе [1]. Были рассчитаны этапные смещения и на их основании построены графики распределения этапных значений смещений вдоль вектора скорости  $\Delta X$  и вектора подачи  $\Delta Y$ .

Наибольший размер очага деформации имел место на зубе № 1 дорна, который полностью обработал отверстие и вышел из контакта вместе с созданным им очагом деформации. Вследствие того что очаг деформации перемещается вместе с инструментом, а натяг между первым и последующим зубом дорна не велик, очаг деформации на последующих зубьях не будет иметь четких границ, в отличие, например, от обработки отверстия шариком с остановкой процесса в фиксированном положении вдоль образующей отверстия. Каждый последующий зуб дорна будет иметь свой очаг деформации, который невозможно отследить даже при значительном увеличении. Поэтому не представляется возможным разделить очаг деформации на 3 зоны, где зона 1 — с опережающей пластической деформацией, зона 2 расположена непосредственно под зубом инструмента и зона 3 расположена за зубом инструмента. По этой причине полученные графики распределения этапных значений смещений вдоль вектора скорости  $\Delta X$  и вектора подачи  $\Delta Y$  не могут быть привязаны строго к очагу деформации конкретного зуба, но могут описывать процесс пластической деформации, имеющий место в поверхностном слое. При этом смещение  $\Delta X$ , положительное направление которого совпадает с направлением скорости дорнования и находится впереди идущей волны деформации, а там, где  $\Delta X$  имеет отрицательное значение, свидетельствует о смещении металла в сторону, обратную направлению скорости дорнования. Положительное смещение  $\Delta Y$  совпадает с направлением из тела обрабатываемой детали. Это течение металла имеет в значительной мере пластический характер, особенно в слоях расположенных ближе к образующей отверстия и частично упругий характер для удаленных от отверстия слоев.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Смелянский В.М.* Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. — М.: Машиностроение, 2002. [*Smeljanskiy V.M.* Mehanika uprochneniya detalej poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem. — М.: Mashinostroyeniye, 2002.]
- [2] *Кошеленко А.С., Макеев О.А., Солис Пинарготе Нестор Вашингтон.* Исследование методом делительных сеток деформированного состояния дорнованного отверстия // Тезисы докладов Международной научно-практической конференции «Инженерные системы — 2010». Москва, 2010. — М.: Изд-во РУДН, 2010. — С. 138—139. [*Koshelenko A.S.,*

*Makeev O.A., Solis Pinargote Nestor Vashington. Issledovanie metodom delitelnyh setok de-  
formirovannogo sostojanija domovannogo otverstija // Tezisy dokladov Megdunarodnoi nauch-  
no-prakticheskoi konferentsii. Moskva, 2010. — M.: Izd-vo RUDN, 2010. — S. 138—139.]*

## **AN EXPERIMENTAL STUDY BY METHOD OF SEPARATORY GRIDS OF A DEFORMED STATE OF A MANDREL OPENING**

**A.S. Koshelenko, O.V. Zhed,  
Solis Pinargote Nestor Washington**

Peoples' Friendship University of Russia  
*Miklukho-Maklaya srt., 6, Moscow, Russia, 117198*

The subject of this research work was the burnishing process of a cylindrical opening of a multi-cuspid mandrel (push burnishing broach). It was examined by dividing the change in mesh texture of the surface layer of metal fibers in a section of a cylindrical opening, which coincides with the axis of the mandrel opening of the assembled bush. Processing of the distortion of the grid and comparing the results with its initial parameters allow to establish the nature and depth of distribution of the elastoplastic deformation.

**Key words:** burnishing process, push burnishing broach, separatory grids, elastoplastic deformation.