

## **Исследование влияния остаточных напряжений на точность штамповки листовых деталей при разделительных операциях**

*Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка*

Приведены исследования влияния остаточных напряжений листовых деталей, получаемых при разделительных операциях, возникающих из-за деформированного состояния заготовки и перераспределения напряжений в детали после пробивки в них отверстий. Установлены величины искажения диаметра в зависимости от конструктивных параметров заготовки и детали. Предложена инженерная методика расчета погрешностей штамповки, учитывающая влияние остаточных напряжений.

**Ключевые слова:** точность, напряжения, деформация, погрешность, штамповка, пробивка, отверстие.

### **Постановка проблемы и анализ последних исследований**

В машиностроении изготовление детали – это степень приближения её формы и размеров к заданным чертежами формам и размерам. При штамповочных операциях под точностью подразумевается разность между предельными отклонениями любого её параметра. На точностные параметры изготавливаемых деталей влияют производственные погрешности: погрешности оборудования, инструмента, неоднородность материала, конструктивные особенности заготовки и детали и т. д [1, 2].

По своему виду дефекты сведены к отклонению от формы и размеров отштампованных деталей.

Кроме того, что на точность пробиваемых отверстий в листовых деталях влияют остаточные напряжения в них после деформирования. Теоретически эти погрешности рассчитать не представляется возможным, а исследований о влиянии остаточных напряжений на результирующую точность штамповки недостаточно. Особенно этот вопрос приобретает существенное значение при пробивке-вырубке прецизионных деталей [3, 4].

Цель работы – исследование влияния остаточных напряжений на точностные параметры штампованных деталей, которые впоследствии эксплуатируются в силовых условиях.

### **Изложение основного материала**

Исследование влияния остаточных напряжений на точностные параметры штампованных деталей связано, с одной стороны, с изучением деформированного состояния заготовки, а с другой стороны – с перераспределением напряжений в деталях после штамповки.

Решение обоих вопросов сводится к решению плоской задачи теории упругости. В аналитическом исследовании была предпринята попытка применить для нашего случая решение задачи Кирша – о распределении напряжений у малых отверстий, выполненных в напряженной пластине. Распространить решение Кирша на все возможные в практике штамповки случаи не представляется возможным в силу действующих ограничений, а именно: решение задачи Кирша справедливо при отношении ширины заготовки к диаметру отверстия не менее четырех. Однако в практике часты случаи, когда это

отношение гораздо ниже и приближается к единице. Поэтому в целях установления разницы между решением Кирша и рассматриваемыми случаями, а также для получения трансформирующих коэффициентов были проведены экспериментальные исследования по изучению напряженного и деформированного состояния штампуемых полос с различными диаметрами отверстий.

Напряженное состояние полос изучалось с помощью метода фотоупругости на плоских моделях шириной 50 мм и толщиной 6,0 мм, выполненных из оптически активного материала ЭД-6М. Расчет цены одной полосы определяли при сжатии диска диаметром 35,8 мм по формуле

$$\delta_0^t = \frac{8P}{n\pi dt}, \quad (1)$$

где  $\delta_0^t = 25,7 \frac{\text{кг} / \text{см}^2}{\text{пол.}}$  – цена одной полосы; P – сжимающее усилие,

направленное по одному из диаметров диска; n – номер полосы в центре диска (порядок полосы), d, t – диаметр и толщина диска (исходные размеры).

Было исследовано три модели, в которых выполнены отверстия диаметром 20, 32 и 40 мм. Растягивающая нагрузка, имитирующая действие остаточных напряжений, создавалась на рычажном прессе УП-6. Исследования проводили на полярископе EMW-56 фирмы «Меорта» при скрещенном положении оптических осей. Применяли монохроматический источник света (натриевую лампу) для получения черно-белой картины и белый свет при фотографировании цветной картины. Тарировку материала выполняли также при скрещенных оптических осях и монохроматическом источнике света.

В качестве натурной принята полоса шириной 100 и толщиной 6,0 мм, находящаяся под действием растягивающих напряжений  $\delta_x = 10 \text{ кг} / \text{см}^2$ . Установлено, что на контурах отверстий по осевому диаметру действуют сжимающие напряжения, но они имеют малые величины. По диаметру нормального направления действуют растягивающие напряжения значительной величины. Они являются наиболее опасными.

Трансформирующие коэффициенты определены по следующей формуле:

$$\alpha = \frac{(\sigma_x / \sigma_{max})_{\exists}}{(\sigma_x / \sigma_{max})_T}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – трансформирующий коэффициент;  $\sigma_{max}$  – максимальные напряжения;  $\sigma_x$  – нормальные напряжения.

Из полученной зависимости видно, что с ростом отношения b/a величина трансформирующего коэффициента  $\alpha$  резко падает и при b/a > 4 стремится к единице.

При экспериментальном определении трансформирующего коэффициента, дающего возможность использовать полученное на основе задачи Кирша теоретическое решение в случае пробивки отверстия, диаметр которого соизмерим с шириной полосы, применяли металлические полосы из Ст3 шириной 100 мм следующих толщин: 4,0, 5,0, 3,0, 2,0 мм. В каждой из них пробивались отверстия следующих диаметров 80, 60, 40, 26 мм, т.е. отношение ширины полосы к диаметру отверстия соответственно составляло 1,25, 1,67, 2,5 и 3,84.

Величина остаточных напряжений в полосе, вызванных анизотропией материала после прокатки и другими причинами, искажает диаметр полученного отверстия в пределах нескольких микрометров. Поэтому для повышения точности проводимых экспериментов напряжение в полосе искусственно увеличивалось до заданных значений в области упругих деформаций, т.е. моделировались повышенные остаточные напряжения.

Для снятия имеющихся в материале остаточных напряжений полосы подвергались отжигу, после чего в них пробивались отверстия указанных диаметров. Для моделирования повышенных остаточных напряжений в исследуемом материале полосы нагружались осевыми растягивающими усилиями на универсальной испытательной машине УИМ-50. Изучаемые полосы устанавливались в захваты испытательной машины и растягивались при 5-ступенчатом увеличении нагрузки, причем максимальная нагрузка вызывала напряжения, не превышающие предела пропорциональности в сечении с минимальной площадью поперечного сечения.

При этом во всех случаях диаметр отверстий вдоль оси полосы увеличивался, а в направлении, перпендикулярном осевому, уменьшался. Изменение величины диаметров в пробитых отверстиях фиксировало с помощью рычажно-зубчатых индикаторов типа ИРБ с ценой деления шкалы 0,01 мм. Каждый цикл ступенчатого нагружения для всех диаметров и толщин повторялся не менее трех раз. В процессе исследования было проведено более 250 замеров искажения диаметров пробитых отверстий.

При этом установлено, что зависимость изменения диаметра пробитого отверстия от величины остаточных напряжений носит линейный характер. Абсолютная величина изменения диаметров пробитых отверстий уменьшается с уменьшением исходного диаметра при фиксированном значении остаточных напряжений как вдоль оси полосы, так и в поперечном направлении. Причем интенсивность уменьшения искажения диаметра монотонно снижается при увеличении отношения  $b/a$ , а при  $b/a > 4$  рассматриваемое искажение размеров стремится к постоянному теоретическому значению. Следует отметить, что увеличение диаметра пробитого отверстия  $\Delta$  вдоль оси полосы в зависимости от отношения  $b/a$ , показанного на рис 1. получено при определенном значении  $\delta_x = 1 \text{ кг} / \text{см}^2$ .

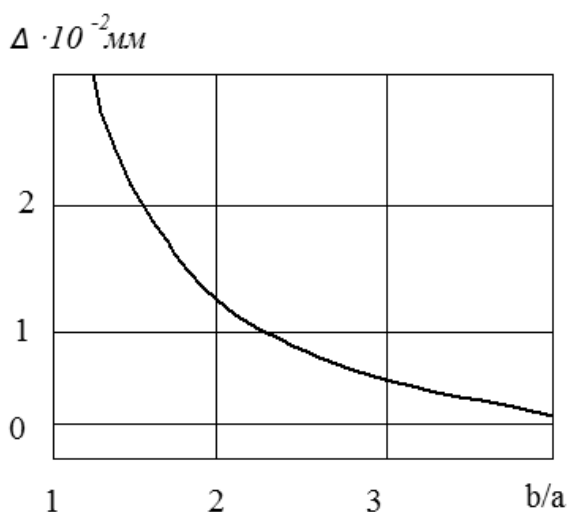


Рис. 1. Изменение диаметра пробиваемого отверстия  $\Delta$  в зависимости от отношения  $b/a$

Для удобства характеристики теоретической величины  $\Delta$  искажения диаметра отверстия, пробитого в напряженной полосе, на рис. 2 показана зависимость для определения поправочного коэффициента по формуле

$$\beta = \frac{\Delta_{\text{э}}}{\Delta_{\text{т}}}, \quad (3)$$

где  $\Delta_{\text{э}}$  – величина изменения диаметра, полученного из эксперимента;

$\Delta_{\text{т}}$  – величина теоретического изменения диаметра отверстия, полученного по формуле

$$\Delta_{\text{т}} = \frac{4a\delta x}{E}. \quad (4)$$

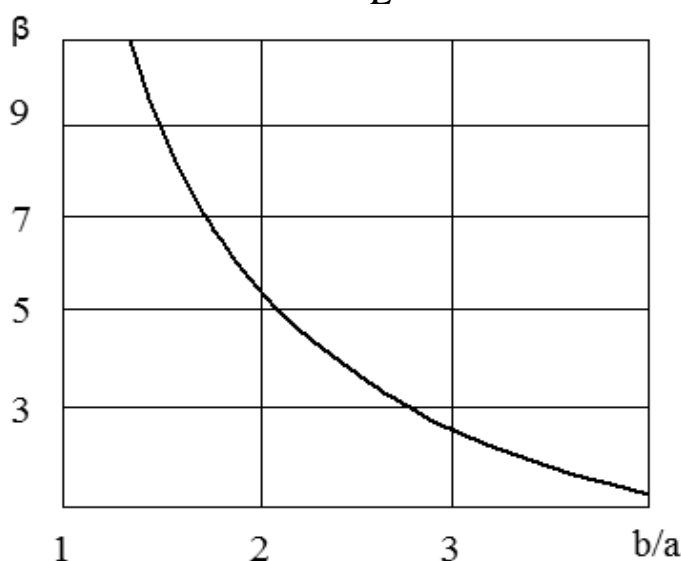


Рис. 2. Значение поправочного коэффициента  $\beta$  в зависимости от величины отношения  $b/a$

Из этого графика видно, что при  $b/a > 4$   $\beta$  стремится к единице, т.е. действительное значение приближается к теоретическому.

При практических расчетах, когда величины ширина полосы и диаметр отверстия соизмеримы, необходимо вычислить значение отношения  $b/a$ , а затем из зависимости, показанной на рис. 2, определить величину поправочного коэффициента  $\beta$ , по формуле (4) найти теоретическое значение диаметра  $\Delta_{\text{т}}$  и умножить его на  $\beta$ , т.е.  $\Delta_{\text{э}} = \beta \cdot \Delta_{\text{т}}$ .

Замер фактических остаточных напряжений в листовом материале (заготовках) производится неразрушающим методом с помощью измерителя остаточных напряжений ИОН. Принцип действия прибора основан на использовании магнитоупругого эффекта, проявляющегося в ферромагнитных материалах под воздействием упругих напряжений. Прибор снабжен датчиками для измерения напряжений на плоских поверхностях с диаметром контролируемой точки 20 мм. Замер напряжений проводили после тарировки прибора по исследуемому материалу (сталь марки Ст3 толщиной 4,0, 5,0, 3,0, 2,0 мм). Образцы материала перед тарировкой отжигали, а затем растягивали на

испытательной машине ИМ4-30. По задаваемым при растяжении напряжениям тарировали прибор.

Определив с помощью прибора величину и направление остаточных напряжений, рассчитали искажение формы пробиваемых в полосах отверстий. Отклонение расчетных от экспериментальных значений величин не превышает 7...10%.

### **Выводы**

На основании проведенных исследований влияния остаточных напряжений на точностные характеристики пробиваемых отверстий в листовых заготовках установлены величины искажения диаметра пробиваемых отверстий в напряженных заготовках и предложена методика практического расчета значений искажения диаметра отверстия в зависимости от отношения ширины полосы к диаметру пробиваемого отверстия при различных толщинах листовой заготовки.

### **Список литературы**

1. Вайнтрауб, Д.А. Повышение точности штампуемых деталей при вырубке и гибке / Д.А. Вайнтрауб // Библиотечка штамповщика. – Выпуск 3, – 1955. – 68 с.
2. Галкин, Н.И. О точности холодноштампованных деталей / Н.И. Галкин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1961. – № 11. – С. 23 – 24.
3. Зубцов, М.Е. Повышение качества и точности штамповки-вырубки крупногабаритных тонколистовых деталей / М.Е. Зубцов // Пути повышения качества и точности. ЛДНТГІ. – 1976. – С. 43 – 50.
4. Манаенков, И.В. Исследование влияния производственных погрешностей на точность выполнения разделительных операций при пневмоударной штамповке / И.В. Манаенков // Вісті Академії інженерних наук України. Спец. випуск «Машинобудування та прогресивні технології»: наук.-техн. та громад. часопис Президії АІН України. – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – № 1(38). – С. 141 – 144.

Поступила в редакцию 04.12.2017

### **Дослідження впливу залишкових напружень на точність штампування листових деталей при розділових операціях**

Наведено дослідження впливу залишкових напружень листових деталей, одержуваних при розділових операціях, що виникають через деформований стан заготовки та перерозподіл напружень у деталі після пробивання в них отворів. Встановлено величини спотворення діаметра залежно від конструктивних параметрів заготовки та деталі. Запропоновано інженерну методику розрахунку похибок штампування, що враховує вплив залишкових напружень.

**Ключові слова:** точність, напруження, деформація, похибка, штампування, пробивання, отвір.

## **Investigation of the Influence of Residual Stresses on the Accuracy of Stamping Sheet Parts During Separation Operations**

In the given work the researches of influence of residual stresses of sheet details obtained at dividing operations, arising from a deformed condition of a workpiece and a redistribution of stresses in a detail after punching holes in them are given. Dimension distortion values are determined depending on the design parameters of the workpiece and the part. The engineering method of calculation of stamping errors, which takes into account the influence of residual stresses, is proposed.

**Keywords:** accuracy, stress, deformation, error, stamping, punching, hole.

### **Сведения об авторах:**

**Фролов Евгений Андреевич** – д.т.н., профессор, зав. каф. технологии машиностроения, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, г. Полтава, Украина. e-mail: frolov.polntu@gmail.com; ORCID: 0000-0001-6257-7022.

**Ясько Станислав Георгиевич** – аспирант, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, г. Полтава, Украина. e-mail: s.g.yasko@gmail.com; ORCID:0000-0001-6228-705X.

**Кравченко Сергей Иванович** – Sergei Kravchenko, к.т.н., доцент, каф. технологии машиностроения, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, г. Полтава, Украина. e-mail: 050Ser09@i.ua