

УДК 621.952

**А. Г. Татьянченко**, д-р техн. наук, проф.,  
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
Тел./Факс: +38 (062) 3010738; E-mail: [sopromat@fimm.donntu.org](mailto:sopromat@fimm.donntu.org)

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ДЕТАЛИ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ КОМБИНИРОВАННЫМ ОСЕВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

*Исследованы особенности развития температурных деформаций детали в зоне резания при чистовой обработке отверстий комбинированным осевым инструментом. Разработана конечно-элементная модель детали типа цилиндрической втулки, позволяющая исследовать как тепловые процессы, так и напряженно-деформированное состояние. Для моделирования процесса обработки отверстия в реальном масштабе времени разработана внешняя управляющая программа, позволяющая представлять непрерывный процесс теплового нагружения в виде множества последовательных дискретных приложений тепловых кольцевых источников по глубине отверстия. Выявлены особенности влияния тепловыделения на первой черновой ступени на температурные деформации в зоне резания второй чистовой ступени. Установлено, что тепловые потоки на первой ступени оказывают влияние не только на величину температурных деформаций детали на второй ступени, но и меняют их направленность, что вызывает искажение продольного профиля отверстия.*

**Ключевые слова.** Комбинированный осевой инструмент, обработка резанием, температурные деформации детали, имитационное моделирование, продольный профиль отверстия.

**A. G. Tatyanchenko**

## SIMULATION MODELING OF TEMPERATURE DEFORMATIONS DETAILS IN CUTTING ZONE AT CLEANING OF HOLE COMBINED AXIAL TOOLS

*The features of the development of temperature deformations of the part in the cutting zone during the finishing of holes with combined axial tools are investigated. A finite element model of a part such as a cylindrical sleeve has been developed, which allows one to study both thermal processes and the stress-strain state. To simulate the hole processing process in real time, an external control program has been developed that allows to represent the continuous process of thermal loading in the form of a number of sequential discrete applications of thermal ring sources along the hole depth. The features of the influence of heat release at the first roughing step on temperature deformations in the cutting zone of the second finishing step are revealed. It was established that the heat fluxes in the first stage affect not only the magnitude of the temperature deformations of the part in the second stage, but also change their directivity, which causes distortion of the longitudinal profile of the hole.*

**Keywords.** Combined axial tools, cutting, thermal deformation of the part, simulation, longitudinal profile of the hole.

### 1. Введение

Одной из основных причин искажения продольного профиля отверстий при их чистовой обработке осевым лезвийным инструментом являются температурные деформации детали в зоне резания [1,2]. Поэтому, для повышения точности чистовой обработки отверстий при лезвийной обработке отверстий развертыванием и зенкерованием необходимо разрабатывать эффективные методы прогнозирования таких деформаций. В работах [3,4,5] разработаны различные аналитические и численные методы прогнозирования температурного состояния и температурных деформаций детали в зоне резания по мере продвижения инструмента вдоль оси отверстия. В них было показано, что процесс изменения температуры в зоне резания и развития термоупругих деформаций по глубине отверстия носит выраженный нелинейный характер и является основной причиной формирования бочкообразного продольного профиля отверстия. При этом

© Татьянченко А.Г.; 2021

дефекты продольного профиля имеют три характерные зоны – при врезании инструмента в начале отверстия, при выходе инструмента в конце отверстия и в середине отверстия. Важнейшим выводом, полученным в этих и других работах, являлся вывод о том, что значительные температурные деформации детали возникают даже при минимальных режимах резания. Поэтому снижение режимов резания не устраняет характерную бочкообразную форму продольного профиля.

Особым видом чистовой лезвийной обработки отверстий является обработка комбинированным осевым инструментом, которая характеризуется наличием двух и более одновременно действующих тепловых источников. В работе [6] на основе разработанной имитационной конечно-элементной тепловой модели обработки отверстия двухступенчатым осевым инструментом предложены методы определения температуры в зоне резания чистовой ступени и сделана оценка влияния черновой ступени на температуру в зоне резания чистовой ступени. Был выявлен нелинейный характер этого влияния и определены некоторые особенности развития краевых эффектов в начале и конце отверстия.

В данной работе на основе предложенных в работе [6] моделей поставлена задача определения температурных деформаций детали в зоне резания второй чистовой ступени при обработке отверстий двухступенчатым осевым инструментом типа зенкер-развертка и развертка-развертка и оценка влияния на них тепловых потоков на первой ступени.

## 2. Основное содержание работы

Решение этой задачи проводилось на основе конечно-элементной модели детали типа цилиндрической втулки длиной  $L$ , наружным диаметром  $D$  и диаметром отверстия  $d$  с использованием внешней управляющей программы.

Как и в работе [6] учитывались особенности развития процесса обработки отверстий двухступенчатым осевым инструментом во времени, которые заключаются в том, что следом за первым тепловым источником  $q_{экв1}$  на расстоянии  $a_{1-2}$  с той же скоростью подачи  $V_n$  движется второй тепловой источник интенсивностью  $q_{экв2}$  (рис. 1). Все эти тепловые источники оказывают взаимное влияние друг на друга.

Для исследования температурных деформаций использовались некоторые положения и алгоритмы, полученные при анализе температурного состояния детали при обработке комбинированным инструментом [6].

Так, интенсивность кольцевых тепловых источников  $q_{экв1}$  и  $q_{экв2}$  определялась как  $q_{экв} = Q_o \tan \varphi / (\pi d t T)$ , где  $Q_o$  – общее количество теплоты, поступающее в деталь за время обработки отверстия,  $T$  – общее время обработки,  $t$  и  $\varphi$  – соответственно глу-

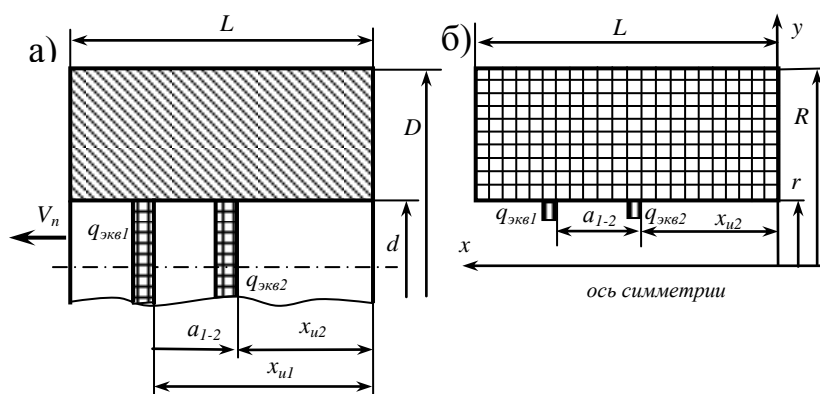


Рисунок 1. Схема теплового нагружения втулки при обработке двухступенчатым осевым инструментом: а) твердотельная модель; б) осесимметричная конечно-элементная модель

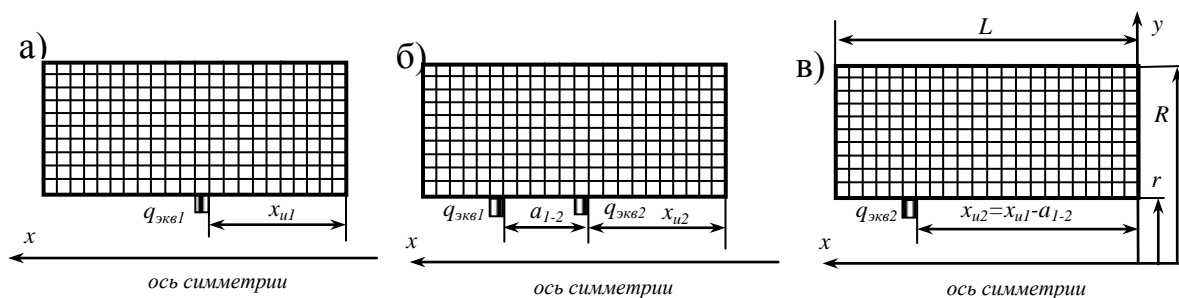


Рисунок 2. Этапы теплового нагружения детали при обработке отверстия двухступенчатым осевым инструментом:

а)  $0 \leq t \leq a_{1-2} / V_n$ ; б)  $a_{1-2} / V_n \leq t \leq L / V_n$ ; в)  $a_{1-2} / V_n \leq t \leq (L + a_{1-2}) / V_n$

бина резания и главный угол в плане. Ширина кольцевых тепловых источников принималась равной  $l_{k1} = l_{k2} = t_2 / \tan \varphi_2$ , где  $t_2$  и  $\varphi_2$  - соответственно глубина резания и главный угол в плане для второй ступени. Интенсивность тепловыделения  $q_{экс1}$  и  $q_{экс2}$  различалась вследствие различной геометрии режущей части ступеней и глубины резания. Интенсивность тепловых источников и время работы ступени определялись на основании данных [3].

Весь процесс обработки делился на три этапа. Первый этап  $0 \leq t \leq a_{1-2} / V_n$  (рис. 2а) – обработка ведется только одной ступенью, и температурное состояние определяется только тепловым источником  $q_{экс1}$ . Второй этап  $a_{1-2} / V_n \leq t \leq L / V_n$  (рис. 2б) – обработка ведется одновременно двумя ступенями и температурное состояние определяется двумя одновременно действующими тепловыми источниками  $q_{экс1}$  и  $q_{экс2}$ . Третий этап  $a_{1-2} / V_n \leq t \leq (L + a_{1-2}) / V_n$  (рис. 2в) – обработка ведется только второй ступенью и температурное состояние определяется только тепловым источником  $q_{экс2}$ . Моделирование процесса движения осевого инструмента производилось путем последовательного приложения тепловых источников по глубине отверстия.

Поскольку стандартные комплексы МКЭ не позволяют производить такое моделирование (одновременное изменение положения и интенсивности тепловых источников в конечно-элементной модели) была разработана и интегрирована в комплекс МКЭ внешняя управляющая программа на основе языка FORTRAN. Для этого весь процесс создания конечно-элементной модели детали и имитации движения инструмента вдоль оси отверстия был представлен в виде программы на параметрическом языке APDL. Это позволило не только смоделировать процесс поступательного движения осевого инструмента вдоль оси отверстия, но и дало возможность вносить изменения значений входных параметров без выхода из системы. За счет этого оказалось возможным исследовать влияние различных параметров на исследуемые процессы.

Для определения температурных деформаций использовалась известная опция комплексов МКЭ, позволяющая без изменения геометрии модели преобразовывать тепловые модели в структурные за счет изменения типов конечных элементов. В данной модели такая замена производилась также без выхода из системы.

Поскольку физически образование температурных деформаций детали является следствием ее линейного температурного расширения при повышении температуры, задача сводилась к последовательному определению полей деформаций для каждого шага нагружения, определения радиальных смещений в зоне резания и построению диаграммы продольных смещений. Поскольку образование температурных деформаций

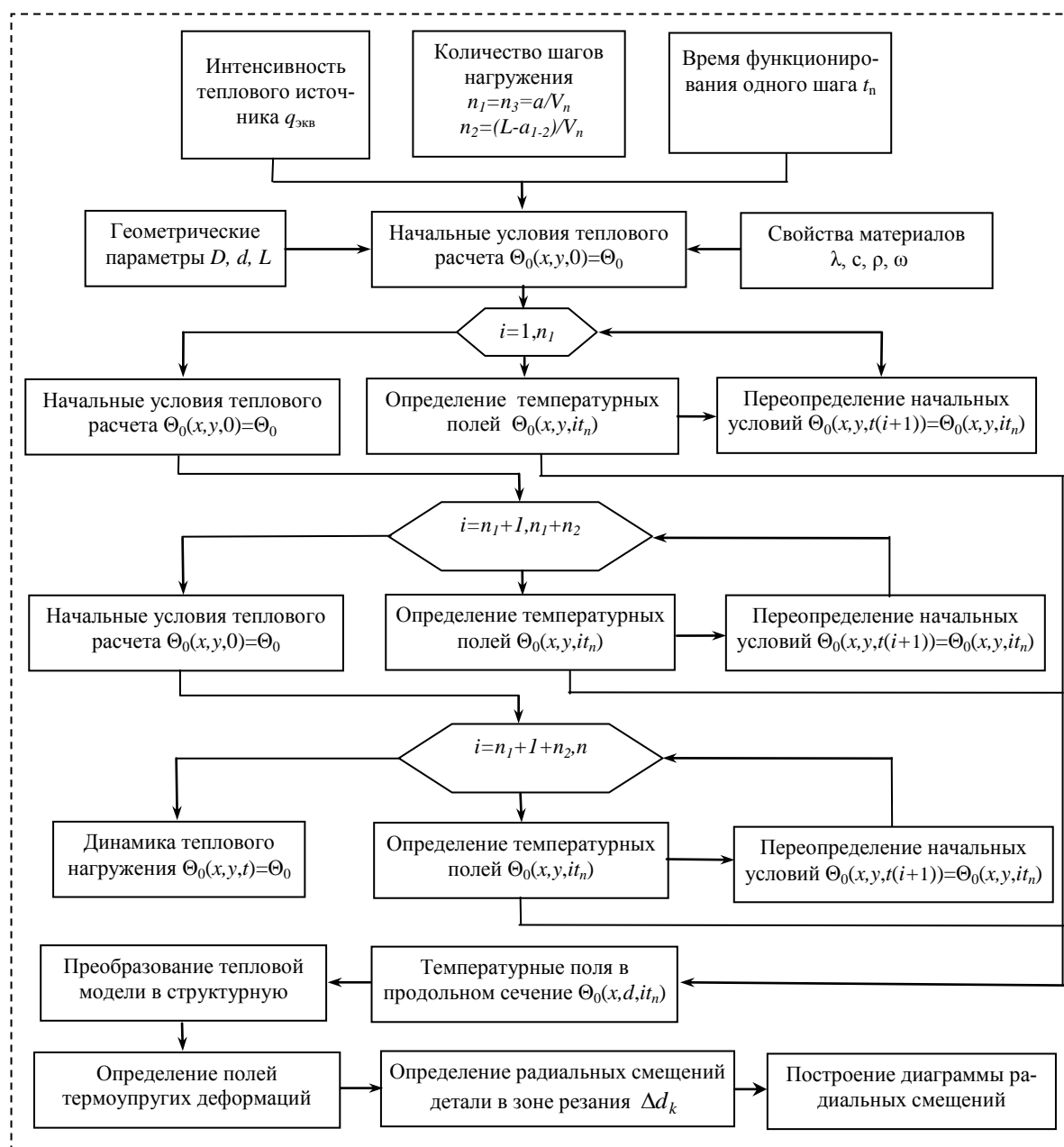


Рисунок 3. Блок-схема математической модели исследования температурных деформаций детали в зоне резания второй ступени двухступенчатого осевого инструмента источника

детали происходит одновременно с процессом резания, именно эта диаграмма будет отражать форму продольного профиля отверстия после обработки.

Блок-схема алгоритма математической модели исследования температурных полей и температурных деформаций при обработке двухступенчатым осевым инструментом и описывающей ее параметрической программы приведена на рис.3.

При исследовании температурных деформаций детали начальные условия для первого шага нагружения принимались равными  $\Theta_0(x, y, 0) = \Theta_0$ , где  $\Theta_0$  – температу-

ра окружающей среды. За начальные условия для последующих шагов принимались результаты предыдущего шага.

При обработке отверстия двухступенчатой разверткой использовались следующие входные параметры:  $L=50\text{мм}$ ,  $D=75\text{мм}$ ,  $d=16\text{мм}$ , первая ступень – число зубьев  $z=8$ , задний угол  $\alpha=10^\circ$ , передний угол  $\gamma=0^\circ$ , радиус округления основной и вспомогательной режущих кромок  $\rho=\rho_1=20\text{мкм}$ , главный и вспомогательный угол в плане  $\varphi=15^\circ$ ,  $\varphi_1=0$ , вторая ступень –  $z=8$ ,  $\alpha=10^\circ$ ,  $\gamma=0^\circ$ ,  $\rho=\rho_1=20\text{мкм}$ ,  $h_n=0,2\text{мм}$ ,  $\varphi=45^\circ$ ,  $\varphi_1=0$ ,  $l_3=20\text{мкм}$ , материал детали – сталь 45,  $\lambda_o=40,2\text{Вт/м}\cdot\text{град}$ ,  $\omega=0,000008\text{м}^2/\text{с}$ , материал инструмента – сталь Р6М5,  $\lambda_{и}=27,2\text{Вт/м}\cdot\text{град}$ , режимы резания:  $S=1,6\text{ мм/об}$ ,  $V=8,04\text{м/мин}$ ,  $t_1=0,16\text{мм}$ ,  $t_2=0,04\text{мм}$ . При обработке отверстия осевым инструментом зенкер-развертка  $L=50\text{мм}$ ,  $D=75\text{мм}$ ,  $d=16\text{мм}$ , развертка –  $z=8$ ,  $\alpha=10^\circ$ ,  $\gamma=8^\circ$ ,  $\rho=20\text{мкм}$ ,  $\rho_1=20\text{мкм}$ ,  $\varphi=15^\circ$ ,  $\varphi_1=0$ , зенкер –  $z=4$ ,  $\alpha=8^\circ$ ,  $\gamma=10^\circ$ ,  $\rho=20\text{мкм}$ ,  $\rho_1=20\text{мкм}$ ,  $\varphi=60^\circ$ ,  $\varphi_1=0$ , материал детали – сталь 45,  $\lambda_d=40,2\text{Вт/м}\cdot\text{град}$ ,  $\omega=0,000008\text{м}^2/\text{с}$ , материал инструмента сталь – Р6М5,  $\lambda_{и}=27,2\text{Вт/м}\cdot\text{град}$ , режимы резания:  $S=0,4\text{ мм/об}$ ,  $V=13,32\text{м/мин}$ ,  $t_1=0,8\text{мм}$ ,  $t_2=0,2\text{мм}$ .

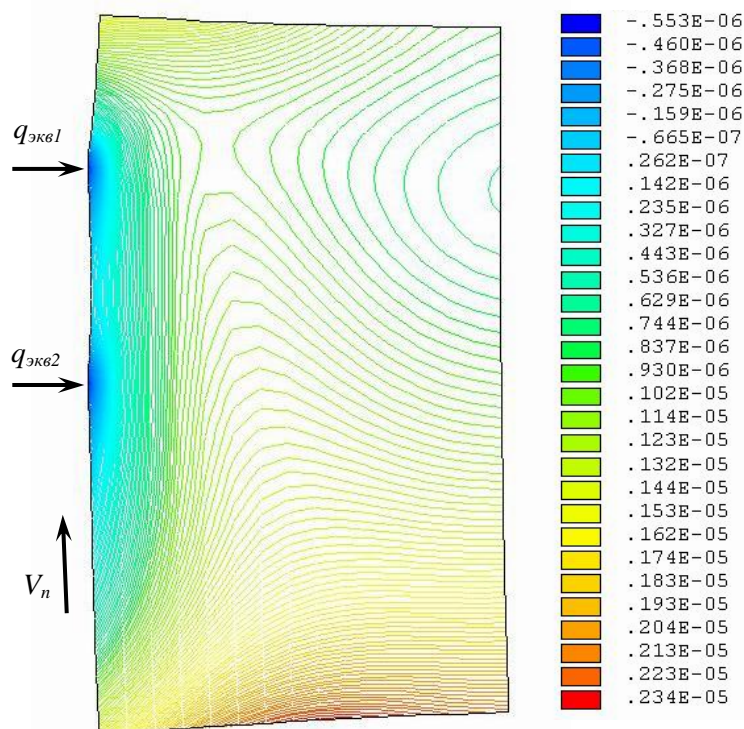


Рисунок 4. Характер распределения радиальных смещений точек продольного сечения детали для произвольного положения двухступенчатого осевого инструмента.

На рис. 4 приведена характерная форма полей радиальных смещений точек продольного профиля детали для половины отверстия (вторая половина будет симметричной) для произвольного положения осевого инструмента по глубине отверстия. Величина радиальных смещений по шкале справа приведена в метрах. Вполне логично, что максимальные смещения возникают в точках приложения тепловых источников первой и второй ступени.

Из рисунка видно, что радиальные смещения различных точек детали имеют не только разную величину, но и знак, т.е. направленность.

Смещения точек в зоне резания второй ступени имеют знак «минус», что соответствует смещению внутрь отверстия и при одновременном процессе резания способствует снятию

дополнительного материала и в последствие вызывает разбивку отверстия. Такой же эффект был выявлен автором ранее при исследовании процесса обработки одномерным осевым инструментом [3] и объясняется ограниченностью зоны нагрева.

На основе предложенной выше математической модели были исследованы температурные деформации детали типа цилиндрической втулки для различных вариантов чистовой обработки отверстий двухступенчатым осевым инструментом. На рис. 5 и 6 приведены некоторые результаты исследований для приведенных выше

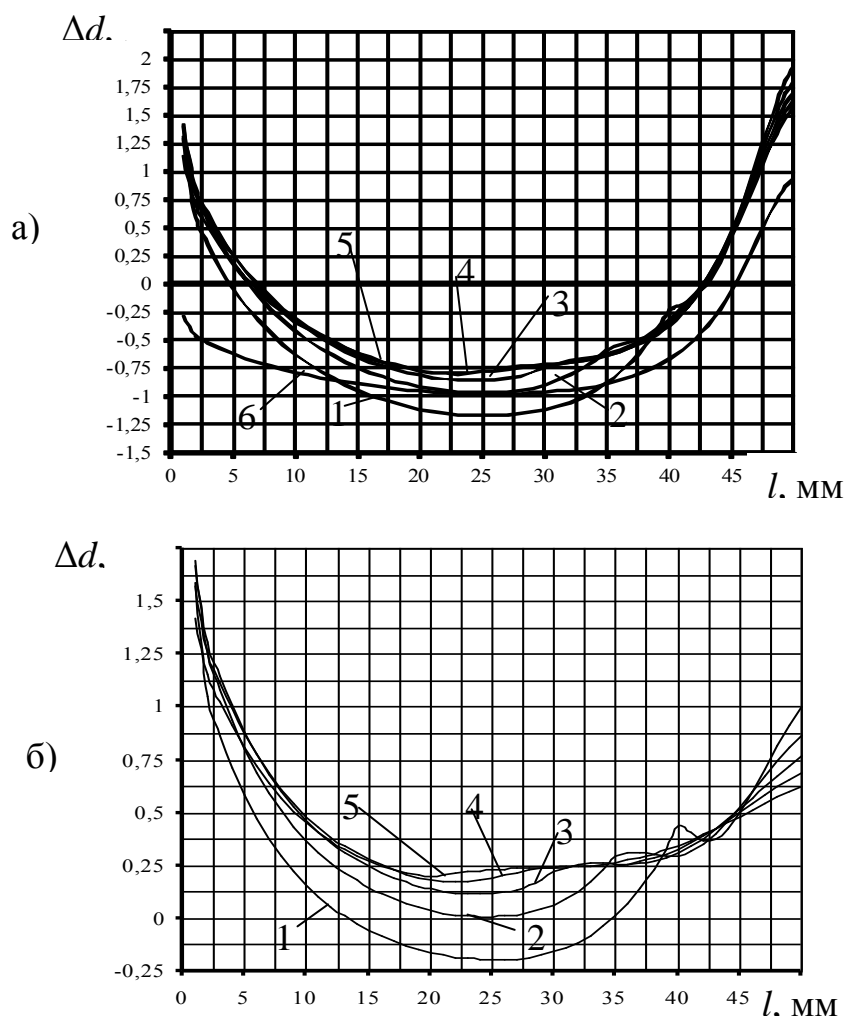


Рисунок 5. Температурная деформация детали при обработке отверстия двухступенчатым инструментом зенкер-развертка: а) в зоне резания второй ступени; б) приращение за счет влияния первой ступени : 1)  $a_{1-2}=10$ мм; 2)  $a_{1-2}=15$ мм; 3)  $a_{1-2}=20$ мм; 4)  $a_{1-2}=25$ мм; 5)  $a_{1-2}=30$ мм; б) при обработке одной второй ступенью

условий обработки отверстия комбинированным инструментом зенкер-развертка (рис. 5) и развертка-развертка (рис. 6) для различных значений расстояния между ступенями  $a_{1-2}$  и деталей различной массовой теплоемкости. Как уже указывалось выше, основными результатами для данных исследований являются величина радиальных смещений  $\Delta d$  в зоне резания второй ступени и изменение этой величины за счет влияния тепловых потоков на первой ступени. На диаграммах на рис. 5а и 6а показан характер изменения температурных деформаций (радиальных смещений  $\Delta d$ ) в зоне резания второй ступени по мере продвижения осевого инструмента по глубине отверстия, а на рис. 5б и 6б – дополнительные радиальные смещения на второй ступени, полученные за счет тепловых потоков в зоне резания первой ступени.

Из приведенных диаграмм видно, что за счет влияния предыдущих ступеней может меняться не только величина температурной деформации в зоне резания последней ступени, но и ее знак. Температурное поле предыдущей ступени во всех случаях оказывает негативное влияние на точность обработки отверстия, увеличивая его бочкообразность. Наибольшее влияние предыдущие ступени оказывают при малых

расстояниях между ступенями ( $a_{1-2} < 15$  мм). При больших значениях  $a_{1-2}$

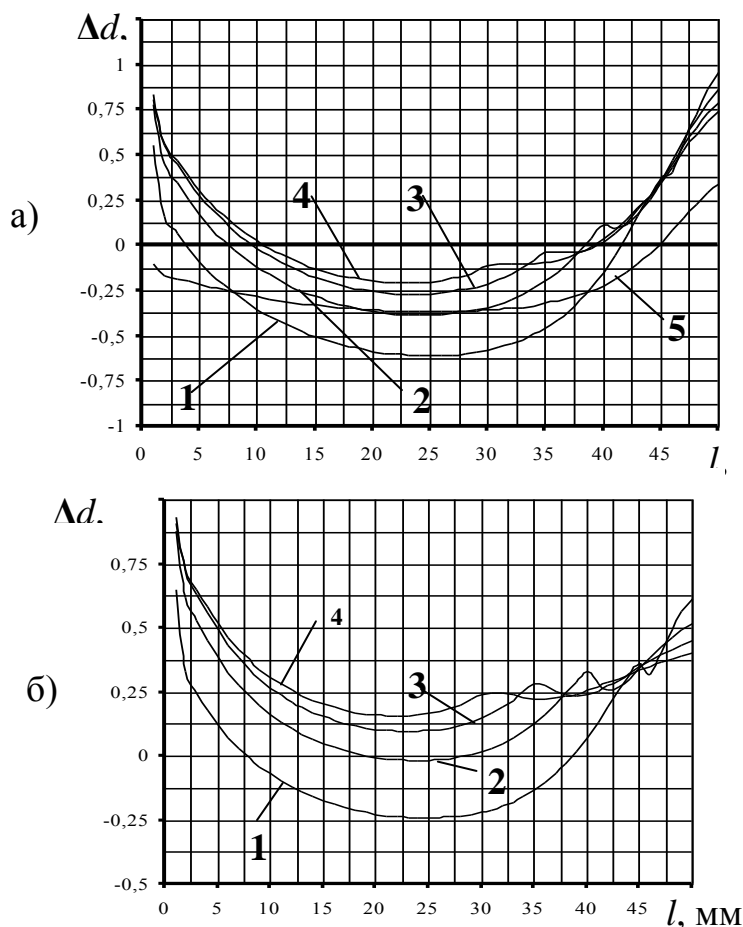


Рисунок 6. Температурная деформация детали при обработке отверстия двухступенчатой разверткой а) в зоне резания второй ступени; б) приращение за счет влияния первой ступени: 1)  $a_{1-2}=5$  мм; 2)  $a_{1-2}=10$  мм; 3)  $a_{1-2}=15$  мм; 4)  $a_{1-2}=20$  мм; 5) при обработке одной второй ступенью.

наблюдается эффект уменьшения разбивки посередине отверстия. Это связано с тем, что при этом увеличивается промежуток времени между действием тепловых источников различных ступеней в данной точке. В результате этого тепло, выделившееся в зоне резания предыдущей ступени, успевает распространиться по всему объему детали, вызывая ее температурное расширение, которое, в свою очередь, частично компенсирует выпучивание материала детали в зоне резания последующей ступени. Это обстоятельство может быть использовано для предотвращения разбивки посередине отверстия за счет регулирования расстояний между ступенями. Однако, при этом бочкообразность отверстия не устраняется.

Следует также отметить характерную форму диаграмм  $\Delta d$ , имеющих характерные всплески влияния на расстоянии  $2/3 a_{1-2}$  от конца отверстия. Очевидно, что это связано с влиянием отраженной тепловой волны предыдущего теплового источника. Однако, это явление требует поведения специальных исследований. Анализ диаграмм, приведенных на рис. 5, 6 показывает, что температурное поле предыдущей ступени во всех случаях оказывает негативное влияние на точность обработки отверстия, увеличивая его бочкообразность. Наибольшее влияние предыдущие ступени оказывают при

малых расстояниях между ступенями ( $a_{1-2} < 15$  мм). При больших значениях  $a_{1-2}$  наблюдается эффект уменьшения разбивки посередине отверстия, но не устраняются дефекты в начале и конце отверстия.

В результате проведенных исследований был разработан алгоритм и численная математическая модель распространения температурных полей и развития температурных деформаций в поперечном сечении осесимметричной детали в процессе обработки отверстия двухступенчатым осевым инструментом, на основе которой установлено:

1) Тепловые потоки на первой ступени двухступенчатого осевого инструмента оказывают влияние не только на величину искажения, но могут вызывать также изменение направленности искажения от разбивки к усадке и наоборот. Наибольшее влияние тепловые потоки первой ступени оказывают на радиальные смещения в зоне резания второй ступени, вызывая усадку отверстия.

2) Увеличение расстояния между ступенями  $a_{1-2}$  способствует уменьшению разбивки посередине отверстия. Однако, при этом бочкообразность продольного профиля отверстия не устраняется.

3) Все рассмотренные диаграммы приращения температурных деформаций в зоне резания второй ступени за счет тепловыделения на первой ступени имеют характерные всплески влияния на расстоянии  $2/3 a_{1-2}$  от конца отверстия. Это связано с влиянием отраженной тепловой волны первой ступени и может быть использовано при разработке методов устранения бочкообразной формы продольного профиля отверстия.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Резников, А. Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
2. Татьяначенко, А. Г. Температурное состояние детали при развертывании отверстий / А.Г. Татьяначенко, И.А. Малышко, С.И. Бочаров // Вісник інженерної академії. – Київ, 2001. – №3. – С. 231-233.
3. Татьяначенко, А. Г. Влияние термоупругих деформаций на точность продольного профиля отверстия при чистовой лезвийной обработке / А.Г. Татьяначенко // Наукові праці Донецького технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип.110. – С. 42-48.
4. Татьяначенко, А. Г. Развитие методов прогнозирования продольного профиля отверстия при чистовой обработке осевым инструментом / А.Г. Татьяначенко, И.А. Малышко, А.Н. Сурженко // Сборник научных работ ДонНТУ. Серія «Машиностроение». – Донецьк: ДонНТУ, 2013. – Вып. 10. – С. 47-54.
5. Татьяначенко, А. Г. Особенности развития термоупругих деформаций детали при чистовой обработке отверстий / А.Г. Татьяначенко, Т.М. Брижан // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. (Зб. наук. праць). – Краматорськ: ДДМА, 2010. – Вип. 27. – С. 96-101.
6. Татьяначенко, А. Г. Особенности развития тепловых процессов при чистовой обработке отверстий комбинированным осевым инструментом / А.Г. Татьяначенко, И.Н. Лапко // Вісник СевНТУ. Збірник наукових праць. Серія «Машинобудування та транспорт». – Севастополь: СевНТУ, 2013. – Вип. 140. – С. 178-183.

Поступила в редколлегию 18.11.2020 г.