

УДК 621.952

А.Г. Татьяначенко, профессор, д-р техн. наук,

И.Н. Лаппо, ассистент

*Донецкий национальный технический университет.**ул. Артема, 58, г. Донецк, Украина, 83000**sopromat@mech.dgtu.donetsk.ua***ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ КОМБИНИРОВАННЫМ ОСЕВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ**

*Исследованы особенности развития тепловых процессов в детали при чистой обработке отверстий комбинированным инструментом. Исследования проводились на основе численных моделей метода конечных элементов с использованием пакета МКЭ ANSYS. Рассмотрены варианты врезания, одновременной работы двух ступеней и выхода осевого инструмента.*

*Ключевые слова:* тепловые процессы, комбинированный осевой инструмент, температурное состояние, двухступенчатый инструмент.

**Введение.** Обработка отверстий осевым инструментом является одной из наиболее ответственных операций механической обработки, поскольку большинство отверстий являются базовыми поверхностями для других деталей. Поэтому от точности обработки отверстий в значительной степени зависит нормальное функционирование всей механической системы. Для обеспечения требуемого качества отверстия при его обработке осевым лезвийным инструментом обычно используются операции чистой обработки – развертывание и зенкерование, для которых характерны минимальные скорости резания. Однако даже такие режимы не позволяют полностью устранить погрешности продольного профиля отверстия, который имеет характерную бочкообразную форму [1]. Это связано с особенностями развития термоупругих деформаций инструмента и детали [2]. Поэтому для предварительной оценки точности продольного профиля отверстия важной научной и практической задачей является прогнозирование температурного состояния детали и инструмента в зоне резания. В данной работе поставлена задача исследования особенностей развития тепловых процессов в детали при обработке отверстия комбинированным осевым инструментом, использование которого позволяет увеличить производительность обработки отверстий.

**Основное содержание и результаты работы.** Процесс механической обработки различных поверхностей, в том числе отверстий, характеризуется наличием в зоне резания нескольких тепловых источников. Применительно к обработке отверстий общепринятым является объединение этих источников в один эквивалентный источник  $q_{экв}$ , который, в связи с тем, что при чистой обработке отверстий скорость резания  $V$  значительно превышает скорость подачи  $V_n$ , обычно представляется в виде кольцевого теплового источника, движущегося со скоростью подачи вдоль отверстия [1]. Такой подход позволяет не только упростить схему тепловыделения в зоне резания, но и привести общую расчетную схему развития тепловых процессов при обработке отверстий к осесимметричной задаче [2]. Это дает возможность при исследовании тепловых процессов рассматривать не объемную задачу, а плоскую для половины сечения. Однако, следует заметить, что подобный подход справедлив только для исследования тепловых процессов в детали. Поэтому ограничимся исследованием тепловых процессов в детали, считая характер распределения тепла между деталью и инструментом известным, и в качестве теплового воздействия на деталь будем рассматривать кольцевые эквивалентные тепловые источники с шириной, равной подаче на один оборот инструмента.

Особенностью обработки отверстий комбинированным осевым инструментом, имеющим две и более рабочие ступени, является то, 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  $q_{экв2}$ , где  $a_{1-2}$  – расстояние между первой и второй ступенями комбинированного инструмента. При трех рабочих ступенях вслед за вторым тепловым источником на расстоянии  $a_{2-3}$  движется третий тепловой источник  $q_{экв3}$  и т.д. Все эти тепловые источники оказывают взаимное влияние друг на друга.

Для решения поставленной задачи с учетом принятой осесимметричной схемой удобно использовать цилиндрическую систему координат и рассматривать лишь половину продольного сечения отверстия, а для оценки температурного состояния детали использовать численный метод конечных элементов с математическим аппаратом для плоской осесимметричной задачи. В качестве объекта исследования в работе был выбран характер распределения температурных полей при чистой обработке отверстия двухступенчатой разверткой и двухступенчатым комбинированным инструментом типа зенкер-развертка.

На рисунке 1 показан переход от объемной задачи (рисунок 1а) к плоской осесимметричной схеме (рисунок 1б). При этом кольцевые тепловые источники трансформируются в линейные источники с такой же интенсивностью. Расчетная конечно-элементная модель теплового нагружения детали двумя кольцевыми тепловым источником интенсивностью  $q_{экв1}$  и  $q_{экв2}$ , движущихся по поверхности отверстия со скоростью подачи  $V_n$  на расстоянии  $a_{1-2}$  друг от друга, приведена на рисунок 1б.

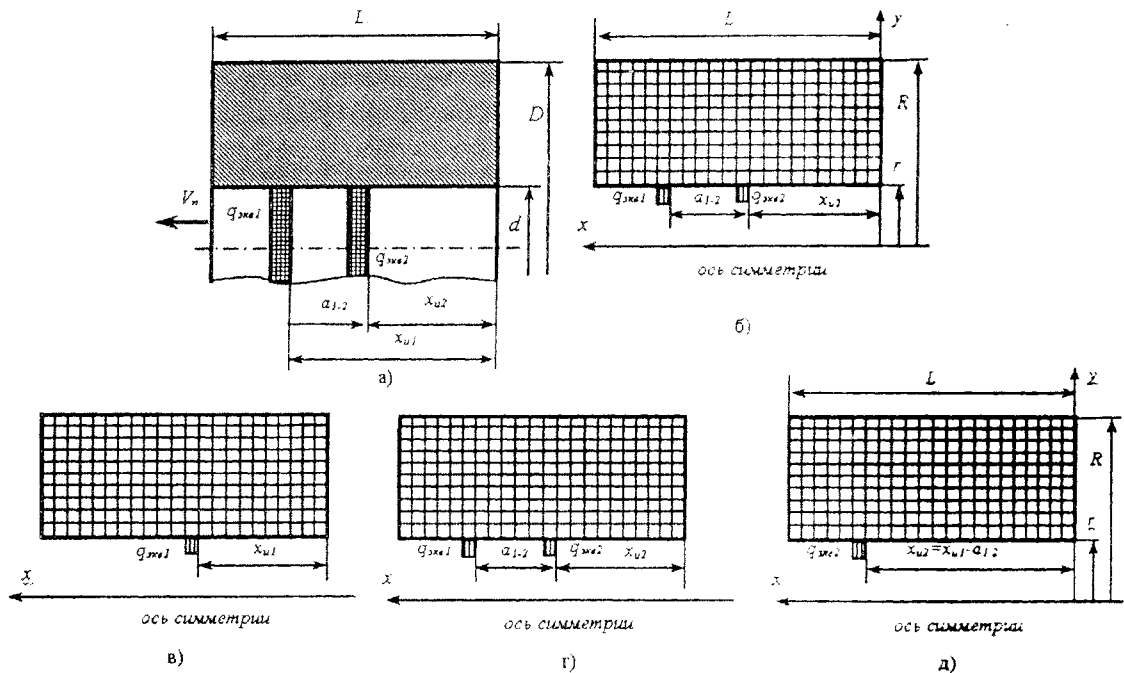


Рисунок 1 – Расчетная конечно-элементная схема и этапы теплового нагружения детали при обработке двухступенчатым осевым инструментом: а) нагружение кольцевым тепловым источником; б) конечно-элементная расчетная схема, в) этап 1 -  $0 \leq t \leq a_{1-2} / V_n$ ; г) этап 2 -  $a_{1-2} / V_n \leq t \leq L / V_n$ ; д) этап 3 -  $a_{1-2} / V_n \leq t \leq (L + a_{1-2}) / V_n$

Интенсивность  $q_{экв1}$  и  $q_{экв2}$  определялась на основе рекомендаций [1], а 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  $q_{экв1}$  и  $q_{экв2}$  различалась вследствие различной геометрии режущей части ступеней и глубины резания. Для всех вариантов теплового расчета боковые поверхности втулки принимались адиабатическими. Основной целью исследования было определение взаимного влияния тепловых источников друг на друга. Поскольку для обоих инструментов чистовой являлась вторая ступень, наибольший практический интерес представляет степень влияния первой ступени на вторую. Исследование проводилось при  $\lambda(\Theta) = Const$  и  $c\rho(\Theta) = Const$ . Процесс движения теплового источника представлялся в виде пошагового приложения теплового источника к поверхности детали для  $n$  положений, где

$$n = \frac{(L + a_{1-2})}{t_2} \tan \varphi_2. \tag{1}$$

Время обработки отверстия двумя ступенями

$$T = \frac{(L + a_{1-2})}{V_n} = \frac{\pi d(L + a_{1-2})}{SV}. \tag{2}$$

Время функционирования теплового источника для одного положения определялось на основе зависимостей (1) и (2). Весь процесс обработки делился на три этапа. Первый этап  $0 \leq t \leq a_{1-2} / V_n$  (рисунок 1, в). Обработка ведется только одной ступенью и температурное состояние определяется только тепловым источником  $q_{экв1}$ . Второй этап  $a_{1-2} / V_n \leq t \leq L / V_n$ . Обработка ведется одновременно двумя ступенями и температурное состояние определяется двумя одновременно действующими

тепловыми источниками  $q_{экв1}$  и  $q_{экв2}$  (рисунок 1, г). Третий этап  $a_{1-2}/V_n \leq t \leq (L + a_{1-2})/V_n$  (рисунок 1д). Обработка ведется только второй ступенью и температурное состояние определяется только тепловым источником  $q_{экв2}$ .

Начальные условия для первого шага нагружения принимались равными  $\Theta_0(x, y, 0) = \Theta_0$ . За начальные условия для последующих шагов принимались результаты предыдущего шага. Блок-схема алгоритма исследования температурных полей при обработке двухступенчатым осевым инструментом приведена на рисунке 2. Реализация алгоритма производилась путем создания управляющих программ на языке APDL на основе программного комплекса МКЭ ANSYS.

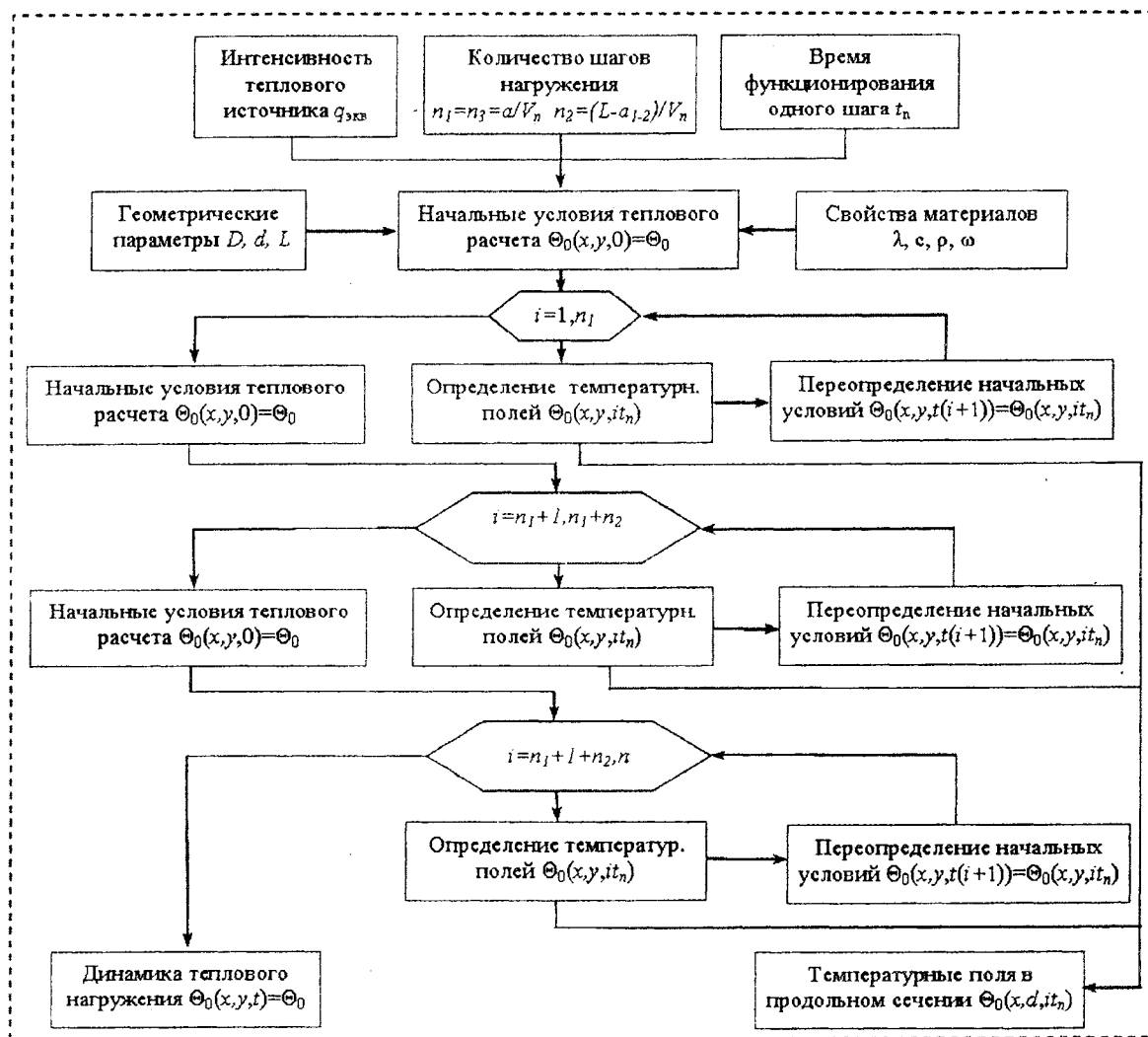


Рисунок 2 – Блок-схема математической модели распределения температурных полей в продольном сечении отверстия при чистовой обработке двухступенчатым осевым инструментом

При определении температуры от действия двух одновременно действующих тепловых источников использовался принцип суперпозиции, справедливость применения которого для комбинированного инструмента показана в работах [1,3]. Температурное состояние в продольном сечении детали в произвольный момент времени было получено как сумма температурных состояний от действия двух тепловых источников

$$\Theta(x, y, t) = \Theta_1(x, y, t) + \Theta_2(x, y, t),$$

где  $\Theta_1(x, y, t), \Theta_2(x, y, t)$  – распределение температур в продольном сечении от первого и второго теплового источника.

Учитывая, что тепловые источники разнесены вдоль оси на расстояние  $a_{1-2}$ , что соответствует интервалу времени функционирования в заданном сечении  $\Delta t = a_{1-2}/V_n$ , температуру в произвольной

точке продольного сечения детали в масштабе времени первого и второго теплового источника  $t_1$  и  $t_2$  определялась как:

$$\Theta(x, y, t_1) = \Theta_1(x, y, t_1) + \Theta_2(x, y, t_1 - a_{1-2} / V_n),$$

$$\Theta(x, y, t_2) = \Theta_1(x, y, t_2 + a_{1-2} / V_n) + \Theta_2(x, y, t_2),$$

или 
$$\Theta(x, y, t_1) = \Theta_1(x, y, t_1) + \Delta\Theta_{1-2}(x, y, t_1), \tag{3}$$

$$\Theta(x, y, t_2) = \Delta\Theta_{2-1}(x, y, t_2) + \Theta_2(x, y, t_2), \tag{4}$$

где параметры  $\Delta\Theta_{1-2}(x, y, t_1) = \Theta_2(x, y, t_1 - a_{1-2} / V_n)$  и  $\Delta\Theta_{2-1}(x, y, t_2) = \Theta_1(x, y, t_2 + a_{1-2} / V_n)$  учитывают влияние соседнего теплового источника на температурное поле действующего теплового источника.

С позиций точности обработки наибольший интерес представляет характер изменения температуры в продольном сечении на поверхности отверстия  $\Theta(x, d/2, t)$ . Согласно (3) и (4) температура на поверхности отверстия будет определяться зависимостями:

$$\Theta(x, d/2, t_1) = \Theta_1(x, d/2, t_1) + \Delta\Theta_{1-2}(x, d/2, t_1),$$

$$\Theta(x, d/2, t_2) = \Delta\Theta_{2-1}(x, d/2, t_2) + \Theta_2(x, d/2, t_2).$$

Температура в зоне действия первого и второго теплового источника  $x_{u1}$  и  $x_{u2}$  соответственно в момент времени  $t_{u1} = f(x_{u1})$  и  $t_{u2} = f(x_{u2})$  будет равна:

$$\Theta(x_{u1}, d/2, t_{u1}) = \Theta_1(x_{u1}, d/2, t_{u1}) + \Delta\Theta_{1-2}(x_{u1}, d/2, t_{u1}), \tag{5}$$

$$\Theta(x_{u2}, d/2, t_{u2}) = \Delta\Theta_{2-1}(x_{u2}, d/2, t_{u2}) + \Theta_2(x_{u2}, d/2, t_{u2}). \tag{6}$$

На рисунке 3 показана диаграмма распределения температур в продольном сечении на поверхности детали для одного положения инструмента согласно зависимостям (5) и (6). Из диаграммы видно, что влияние последующего теплового источника на температурное поле предыдущего минимально. В то же время влияние  $\Delta\Theta_{2-1}$  предыдущего теплового источника на температурное поле последующего может быть значительным и даже сопоставимо по величине с собственной температурой

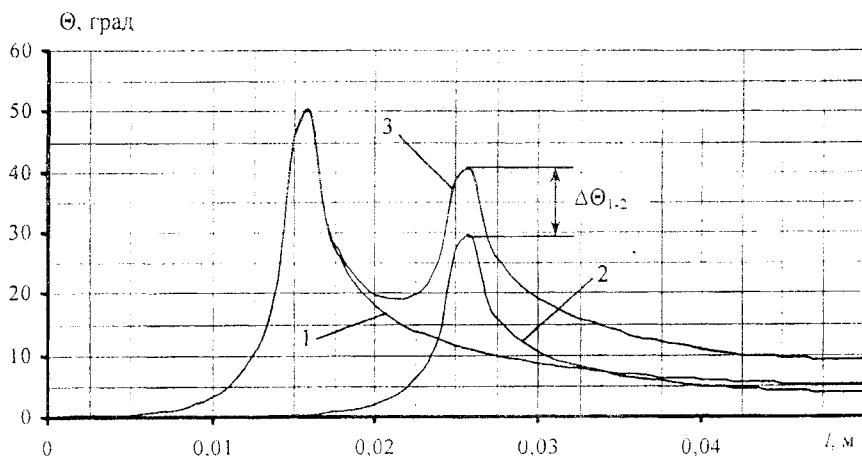


Рисунок 3 – Распределение температур в продольном сечении на поверхности отверстия от двух тепловых источников 1) от первого теплового источника; 2) от второго теплового источника; 3) суммарное распределение температур

теплового источника.

Комбинированный осевой инструмент может использоваться как для последовательной обработки одной поверхности, так и для параллельной обработки нескольких поверхностей. При последовательной схеме наибольшее влияние на точность обработки будут оказывать тепловые процессы на последней ступени. В этом случае основным тепловым параметром, учитывающим влияние тепловых процессов на предыдущей ступени будет параметр  $\Delta\Theta_{1-2}$ , на величину которого оказывают влияние расстояние

между ступенями, коэффициент температуропроводности материала и интенсивность теплового источника на первой ступени.

На рисунке 4 приведены диаграммы изменения параметра  $\Delta\Theta_{1-2} = \Theta$  при обработке сквозного отверстия глубиной 50 мм и диаметром 16 мм в детали типа цилиндрической втулки двухступенчатой разверткой (рисунк 4а) и комбинированным инструментом типа зенкер-развертка (рисунк 4б), а на рисунке 4в и 4г – диаграммы изменения доли этого приращения при определении температуры в зоне резания второй чистой ступени. Анализ диаграмм показывает, что:

1) Для всех вариантов нагружения и всех видов двухступенчатого инструмента диаграмма приращения температуры в зоне резания второй ступени от тепловыделения на первой ступени оказалась качественно идентичной.

2) Наибольшее значения параметр  $\Delta\Theta_{1-2}$  достигает в зоне при выходе из отверстия. При этом максимальное приращение температуры не наблюдается.

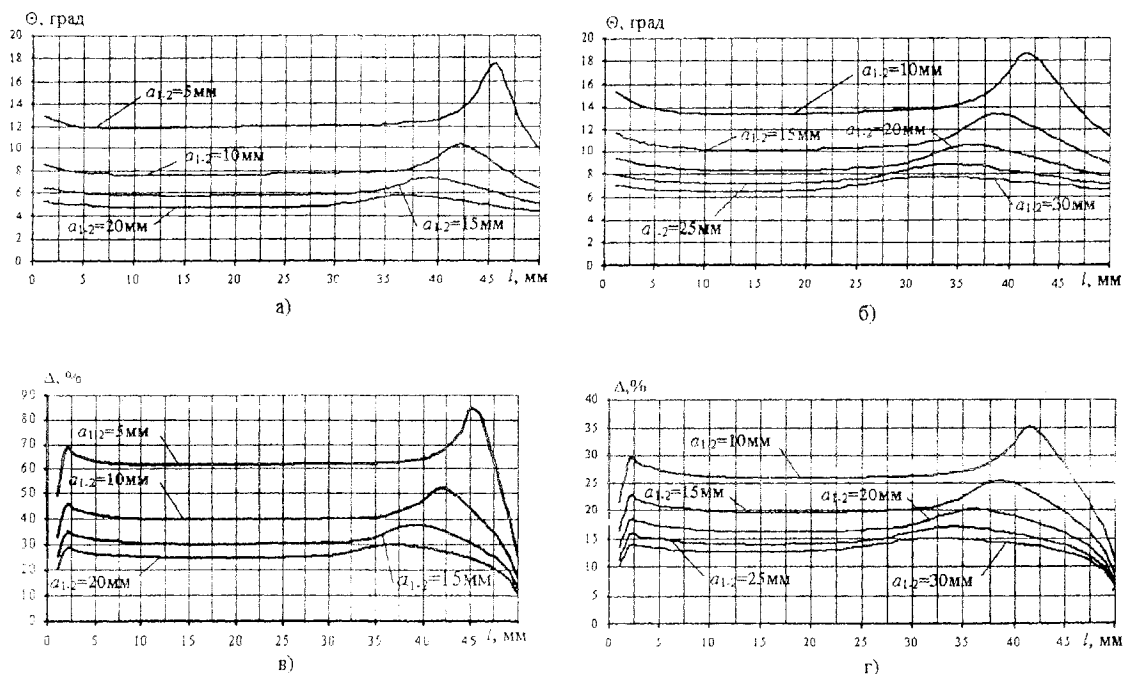


Рисунок 4 – Приращение температуры в зоне резания второй ступени за счет влияния первой ступени:

а) при обработке двухступенчатой разверткой; б) при обработке инструментом зенкер-развертка; в) доля приращения при обработке двухступенчатой разверткой г) доля приращения при обработке зенкером-разверткой

3) Доля приращения температуры в зоне резания второй ступени за счет тепловыделения на первой ступени при обработке двухступенчатой разверткой достигает 85%, а при обработке комбинированным инструментом зенкер-развертка – не превышает 35%.

4) На расстоянии  $\approx 2a_{1-2} / 3$  для всех вариантов нагружения наблюдается выраженный всплеск температуры. Это объясняется тем, что именно в этой точке температурная волна второго источника встречается с отраженной температурной волной первого теплового источника. Величина всплеска зависит от величины  $a_{1-2}$  и при увеличении расстояния между ступенями значительно уменьшается.

5) Влияние теплового источника на первой ступени в значительной степени зависит от соотношения мощностей тепловых источников на первой и второй ступени.

6) Тепловой источник на второй ступени практически не оказывает влияния на температурное состояние детали в зоне резания первой ступени.

**Выводы.** В результате проведенных исследований были установлены особенности влияния первой ступени комбинированного осевого инструмента на температурное состояние детали в зоне резания второй ступени. Полученные результаты могут быть использованы при создании прогрессивных конструкций комбинированного инструмента, обеспечивающего минимальные температурные деформации деталей и при разработке технологических процессов, исключающих негативное влияние экстремальных зон по глубине отверстия.

*Бібліографічний список використаної літератури*

1. Резников А.Н. Термоупругие деформации изделия и инструмента в процессе развертывания / А.Н. Резников, Л.Е. Яжнко // Теплофизика технологических процессов: межвед. науч. сб. — Саратов, 1973. — Вып. 1 — С. 24-35.
2. Тзыльченко А.Г. Влияние термоупругих деформаций на точность продольного профиля отверстия при чистовой лезвийной обработке // Наукові праці Донецького технічного університету. Сер. Машинобудування і машинознавство. — Донецьк, 2006. — Вип. 110. — С. 42-48.
3. Малышко Н.А. Основы теории проектирования осевых комбинированных инструментов: автореф. дис... докт. техн. наук / И.А. Малышко. — К., КПИ, 1995. — 36 с.

*Поступила в редакцию 19.03.2013 г.*

**Татьянченко О.Г., Лаппо І.М. Особливості розвитку теплових процесів при чистовій обробці отворів комбінованим осьовим інструментом**

Досліджені особливості розвитку теплових процесів в деталі при чистовій обробці отворів комбінованим інструментом. Дослідження проводились на основі чисельних моделей метода скінчених елементів с використанням пакету MCE ANSYS. Розглянуті варіанти врізання, одночасної роботи двох ступенів та виходу осьового інструмента.

**Ключові слова:** теплові процеси, комбінований осьовий інструмент, температурний стан, двохступінчастий інструмент.

**Tatyanchenko A.G. Lappo I.N. Features of development of thermal processes at the fair to holes handling with combined axis tool**

Features of development of thermal processes in a part are examined at a final machining of holes by the combined tools. Researches based on the numerical models of a finite element method with use of bundle FEM ANSYS are carried out. Variants of incision, simultaneous operation of two steps and an end of the axial tool are considered.

**Keywords:** the thermal processes, the combined axial tool, a temperature condition, the two-stage tool.