

получены оцифрованные фотограммы нагруженных моделей, выполнена коррекция фотограмм на компьютере в среде Adobe Photoshop для повышения разрешающей способности интерференционных полос, проведена их обработка.

3. Исследовано влияние величины радиуса переходной галтели выкружки зуба на концентрацию и интенсивность напряжений в моделях новой и переточенной шпоночных протяжек. По данным расчетно-экспериментальной информации построены графики зависимости коэффициента $\alpha_{\sigma i}$ концентрации максимальных контурных напряжений в галтелях зубьев и коэффициента $K_{\sigma i}$ интенсивности от параметров β , r_i/h_{ri} и r_i/L_{ri} .

4. Полученная расчетно-экспериментальная информация позволяет рекомендовать ее в прак-

тике расчетов шпоночных протяжек и переносить результаты модельных экспериментов на ее реальную конструкцию, которая изготовлена из инструментального материала с учетом геометрического и силового подобия.

Список литературы

1. **Шеголев А. В.** Конструирование протяжек. — М.: Машгиз. 1960. — С. 352.
2. **Кошеленко А. С., Позняк Г. Г.** Теоретические основы и практика фотомеханики в машиностроении. — М.: ИД «Граница», 2004. — 296 с.
3. **Кошеленко А. С., Жель О. В., Бердашев Р. С.** Исследование методом фотомеханики напряженно-деформированного состояния шпоночной протяжки // Инженерные системы — 2012: Труды V Междунар. науч.-практ. конф. — М.: РУДН, 2012. — С. 327—333.

ТЕХНОЛОГИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.9.042

Реализация метода многоинструментального деформирующего резания при оребрении труб теплообменных аппаратов

д.т.н. Н. Н. Зубков

// Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

E-mail: zoubkovn@bmsu.ru

Аннотация. В статье представлены результаты работ по созданию высокопроизводительной установки для получения наружного оребрения на трубах теплообменных аппаратов методом деформирующего резания. Проведен анализ факторов, влияющих на точность получаемого оребрения. **Ключевые слова:** деформирующее резание; оребрение труб; теплообменные аппараты; многоинструментальная обработка.

Abstract. The article presents the results of works on creation of high-performance unit for receiving external fins on the tubes of heat exchangers method of deforming cutting. The analysis of the factors affecting the accuracy of the fins. **Keywords:** deformational cutting; tube finning; heat exchangers; multitool cutting.

Оребренные трубы широко используют в конструкциях кожухотрубных теплообменных аппаратов, являющихся наиболее распространенным типом теплообменного оборудования. Вес теплообменных труб из цветных металлов в таких аппаратах может достигать десятков тонн [1]. Интенсификация теплообмена путем оребрения теплообменных труб обеспечивает существенное снижение метал-

лоемкости и габарита по сравнению с гладкотрубными конструкциями теплообменников аналогичных характеристик. Если крупношаговое оребрение на трубах эффективно для газовых сред, то теплообменники на основе фазовых превращений (конденсаторы и испарители) требуют использования оребрения с шагами менее 1,5 мм.

Для оребрения с большими шагами возможно увеличение площади теплообменной поверхности труб до 20 раз такими методами как навивка, приварка, пайка, завальцовка ленты, проволочное оребрение, накатка труб. Для мелкошагового оребрения сборные методы получения ребер трудно осуществимы, а методы оребрения труб накаткой имеют существенные ограничения по материалу используемых труб и высоте получаемого оребрения.

По результатам анализа каталогов ведущих зарубежных фирм по производству мелкошаговых

оребранных труб максимальное увеличение площади наружной поверхности после обработки накаткой по сравнению с гладкой составляет 2,6 раза для титана, 4,7 раза для меди и 2,9 раза для сталей, в том числе коррозионно-стойких. В России для медных труб максимально достижимое увеличение площади мелкошаговой теплообменной наружной поверхности не превышает 3,5 раза и не производят накатное оребрение на титановых и стальных трубах.

Метод деформирующего резания (ДР) (рис. 1, а) [2] позволяет производить оребрение на трубном прокате практически из любых сплавов, при этом максимальное увеличение площади поверхности после обработки медных труб составляет до 12 раз [3]. Эффективность оребрения, полученного с помощью метода ДР, подтверждена использованием оребренных труб в промышленности [4–6].

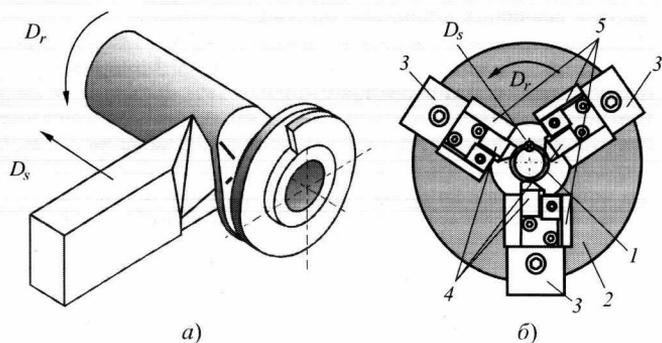


Рис. 1. Принципиальная схема деформирующего резания (а) и трехинструментальный резцовый блок на базе автоматического токарного патрона: 1 — трубная заготовка, 2 — автоматический патрон, 3 — кулачки патрона, 4 — резцовые вставки, 5 — державки инструментов, D_r — главное движение резания, D_s — движение подачи (б)

Мелкосерийное оребрение коротких (до 1 м) труб экономически целесообразно осуществлять на токарном станке, оборудованном подвижным люнетом и правой поддержкой для вращающейся трубы. По технологии, разработанной в МГТУ им. Н. Э. Баумана, поставлено более 10000 оребренных труб для ЗАО «Новомет-Пермь» (г. Пермь), ОКБ «Зенит» (г. Красноярск), ОАО «ДоКон» (г. Домодево) и др. предприятий.

Длина труб в кожухотрубных теплообменниках может составлять несколько метров. Оребрение длинномерных труб на обычном токарном станке возможно, но не рационально ввиду низкой производительности и необходимости обрабатывать

трубу участками с длиной, не более хода продольного суппорта станка. Это потребовало разработки специализированной установки оребрения труб методом ДР.

На основе анализа возможных кинематических схем за основу установки принято главное движение резания — вращательное движение трех инструментов для ДР, при этом движение подачи — поступательное движение трубной заготовки. При принятии решения учитывали также минимизацию затрат на изготовление установки путем использования станины и шпиндельного узла токарно-винторезного станка мод. 16К20.

Оребренная труба должна иметь гладкие необработанные концы для ее закрепления в трубных досках теплообменника, т. е. в процессе обработки необходимо обеспечить ввод инструментов на глубину резания и их вывод по окончании оребрения. Данное требование реализовано размещением инструментов для ДР на кулачках токарного автоматического клинового патрона (рис. 1, б) с приводом радиального движения кулачков от полого невращающегося пневмоцилиндра. Твердосплавные резцовые вставки 4 с геометрическими параметрами инструмента для ДР закреплены в державках 5, размещенных на кулачках 3 автоматического патрона 2. Передачу усилия от невращающегося полого штока пневмоцилиндра к вращающемуся патрону производят через подшипниковый узел с радиальными и упорными подшипниками.

Установка оребрения труб выполнена на базе токарного станка мод. 16К20Ф3С5 с использованием автоматического патрона BISON-BIAL мод. 2409 диаметром 250 мм и с ходом кулачков 5 мм (рис. 2, а). На поперечный суппорт станка установлено устройство подачи трубной заготовки и компенсации крутящего момента от сил деформирующего резания (рис. 2, б). В состав установки входят также устройства поддержки трубной заготовки и оребренной трубы, установленные с правой и левой сторон станка.

Блок подачи трубной заготовки (см. рис. 2, б), принципиальная схема устройства которого показана на рис. 3, осуществляет линейное перемещение трубы вдоль оси шпинделя станка с заданной скоростью по направлению к инструментальному блоку, одновременно компенсируя крутящий момент на трубе от воздействия инструментов. Управление частотой вращения вала электродвигате-

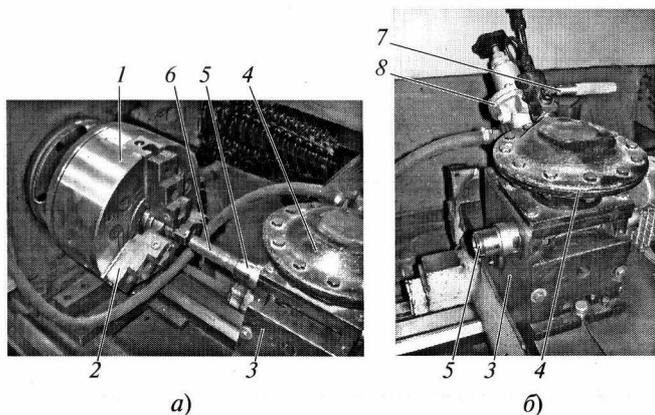


Рис. 2. Инструментальный блок (а) и блок подачи трубной заготовки (б): 1 — автоматический патрон, 2 — кулачки патрона с инструментами для ДР, 3 — корпус блока подачи, 4 — пневмокамера, 5 — цанговая втулка, 6 — трубная заготовка, 7 — кран подачи воздуха в пневмокамеру, 8 — редуктор давления

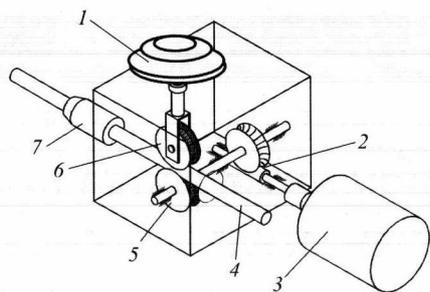


Рис. 3. Принципиальная схема устройства подачи трубной заготовки: 1 — пневмокамера, 2 — червячная передача, 3 — электродвигатель, 4 — трубная заготовка, 5 — ведущий ролик, 6 — прижимной ролик, 7 — центрирующая цанговая втулка

ля 3 блока подачи осуществляется частотным регулятором, что при согласовании с частотой вращения инструментального блока обеспечивает требуемый шаг оребрения.

Тороидальная рабочая поверхность роликов 5 и 6 имеет пирамидальные выступы высотой 1,2 мм и шагом 2,0 мм, что обеспечивает отсутствие проскальзывания трубы при компенсации осевой силы и момента деформирующего резания. Ролики выполнены сборными, состоящими из двух половин. Сборная конструкция роликов благодаря установке шайб между его двумя половинами позволяет добиться максимальной дуги касания ведущего ролика и трубной заготовки.

Центрирование трубной заготовки на выходе из блока осуществляется цанговой втулкой 7, внутренний размер которой настраивается на диаметр

трубной заготовки для обеспечения безлюфтового центрирования.

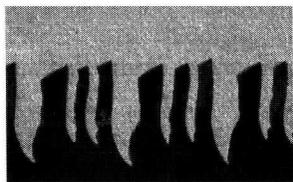
По сравнению с односторонней обработкой, установка оребрения труб с тремя резцами позволяет в несколько раз повысить производительность процесса благодаря утроенному числу режуще-деформирующих инструментов и большим частотам вращения резцового блока, что трудно осуществимо для длинной трубной заготовки. Основные характеристики установки оребрения труб приведены ниже.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

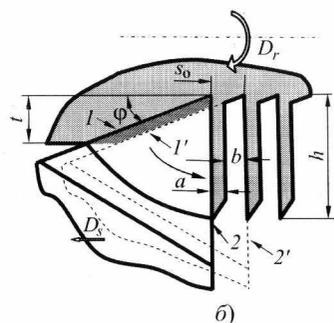
Габарит установки (длина × ширина × высота), мм	2150 × 1450 × 1200
Масса установки, кг	1260
Мощность привода вращения шпинделя, кВт	5,0
Мощность привода подачи трубной заготовки, кВт	0,4
Напряжение питания, В	380
Частота вращения шпинделя, об/мин	1600
Производительность установки, м/мин	$4,8 \times S$, где S — шаг оребрения в мм
Диаметр трубной заготовки, мм	16—20
Шаг оребрения, мм	0,25—1,5
Высота ребер, мм	Для меди до 3 мм, но не более толщины стенки трубной заготовки
Толщина стенки трубной заготовки, мм	не менее 1,5
Материал трубной заготовки	Медь, латунь, титан, медно-никелевые сплавы, сталь
Длина обрабатываемых трубных заготовок, м	3—8
Возможность получения неоребранных участков в любом месте трубной заготовки	Имеется
Стойкость инструментов до их переточки, мин	60

При однозаходном оребрении методом ДР на токарном станке высота ребер и их шаг легко регулируют настройкой глубины резания и подачи. На установке оребрение труб получается трехзаходным, поэтому на его точность оказывает существенное влияние взаимное расположение инструментов. Незначительное рассогласование положения инструментов от расчетного приводит к разношаговости и разновысотности ребер между заходами (рис. 4, а), что потребовало анализа факторов, влияющих на точность получаемого многозаходного оребрения.

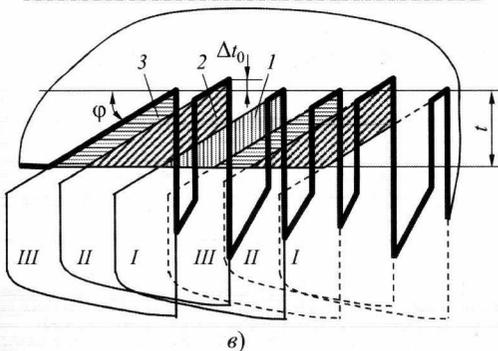
Для анализа, в качестве исходной, принята схема формирования однозаходного оребрения методом ДР (рис. 4, б). Рассматриваемое положение



а)



б)



в)

Рис. 4. Профиль трехзаходного оребрения, полученного инструментами, имеющими погрешность их установки в осевом и радиальном направлениях (материал трубной заготовки титан ВТ1-0, расчетный шаг между ребрами соседних заходов 0,36 мм) (а); схема формирования ребра методом ДР при однокорректной токарной обработке (б) и схема погрешностей получаемого оребрения при погрешности установки одного из инструментов (инструмент II) по глубине резания (в) (t — глубина резания, a и h — толщина и высота ребра, b — ширина межреберного зазора, φ — угол подрезания (главный угол в плане), s_0 — подача на оборот, Δt_0 — погрешность установки инструмента в радиальном направлении, I , 2 и 3 — сечение подрезаемого слоя соответственно инструментами I , II и III , остальные обозначения см. в тексте)

инструмента показано сплошной линией. Пунктирной линией обозначено положение инструмента на предыдущем обороте детали и отстоящего от рассматриваемого на величину подачи на оборот s_0 . Слой, находящийся между смежными положениями I и I' режущей кромки является подрезаемым (на рис. 4, б заштрихован), который не теряя связи с заготовкой деформируется передней поверхностью инструмента и становится ребром. Его положение определяется деформирующей кромкой 2 .

Для вертикальных ребер высота h с достаточной степенью точности определяется глубиной резания t и углом подрезания φ (главным углом инструмента в плане) по формуле $h = t/\sin\varphi + 0,5s_0\cos\varphi$. Толщина ребра $a = s_0\sin\varphi$. Ширина межреберного зазора $b = s_0(1 - \sin\varphi)$ [7].

На установке оребрение труб получается трехзаходным. При расположении инструментов вокруг заготовки с равным угловым шагом для получения равношагового и равновысотного оребрения (между соседними заходами) все их вершины должны лежать в одной плоскости, перпендикулярной к оси заготовки, и иметь одинаковую глубину резания. На практике положение вершин инструментов в существенной степени зависит от точности заточки и базирования инструментов в инструментальном блоке.

На рис. 4, в показан вариант, когда только один из инструментов (инструмент II) имеет погрешность установки Δt_0 в радиальном направлении. Указанная погрешность приводит к изменению толщины слоев, подрезаемых инструментами II и III. Изменение толщины подрезаемых слоев приводит к тому, что только инструмент I формирует ребро расчетной толщины и высоты. Ребро, формируемое инструментом II будет толще и выше, чем расчетное, а ребро, формируемое инструментом III, будет тоньше и ниже.

Как видно, погрешность установки только одного инструмента и только в радиальном направлении, приводит к искажению всех геометрических параметров получаемого оребрения. Погрешность установки других инструментов как в радиальном, так и в осевом направлениях дополнительно искажают профиль получаемого оребрения (рис. 4, в). Видно, что высота, толщина ребер и межреберный зазор существенно отличаются для соседних заходов.

Рассмотрим более подробно вариант, когда инструменты находятся в расчетном положении (не имеют погрешностей установки ни в радиальном, ни в осевом направлениях), а рассматриваемый инструмент имеет погрешность установки в радиальном Δt_1 (рис. 5, а) и осевом Δx_1 (рис. 5, б) направлениях. На рис. 5 обозначено: I — номинальное положение предыдущего инструмента, II — номинальное положение рассматриваемого инструмента и III — фактическое положение рассматриваемого инструмента, имеющего погрешности установки.

Погрешность установки рассматриваемого инструмента по глубине резания Δt_1 в сторону ее увеличения (рис. 5, а) приведет к утолщению Δa_{t1} ребра, уменьшению ширины межреберного зазора Δb_{t1} и увеличению высоты Δh_{t1} формируемого ребра.

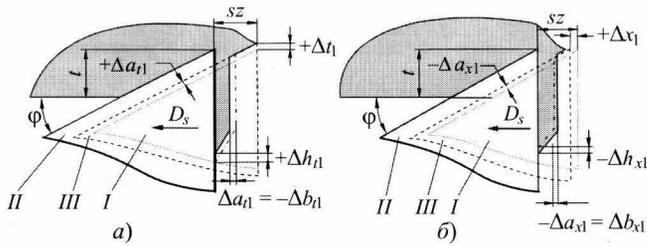


Рис. 5. Влияние погрешностей Δt_1 в радиальном направлении (а) и Δx_1 в осевом направлении (б) установки рассматриваемого резца на геометрические параметры получаемого оребрения при многоинструментальной обработке: *I* — расчетное положение предыдущего резца, *II* — положение рассматриваемого резца, *III* — фактическое положение предыдущего резца, остальные обозначения см. в тексте

Указанные погрешности можно записать в виде выражений:

$$\Delta a_{1l} = -\Delta t_1 \cos \varphi; \quad \Delta b_{1l} = -\Delta a_{1l} = \Delta t_1 \cos \varphi;$$

$$\Delta h_{1l} = -\frac{\Delta t_1}{\sin \varphi} - \frac{\Delta a_{1l}}{2 \operatorname{tg} \varphi} = -\Delta t_1 \left(\frac{3}{2 \sin \varphi} - \frac{\sin \varphi}{2} \right),$$

где Δt_1 — величина погрешности глубины деформирующего резания. Знак (+) — при смещении вершины инструмента к центру, а знак (–) — от центра заготовки.

Погрешность Δx_1 (рис. 5, б) установки вершины текущего инструмента от плоскости, перпендикулярной к оси заготовки, также приведет к искажению профиля получаемого оребрения. Погрешности толщины ребра Δa_{x1} , ширины межреберного зазора Δb_{x1} и высоты ребра Δh_{x1} при формировании инструментом, имеющим погрешность установки в осевом направлении, можно записать в виде: $\Delta a_{x1} = -\Delta x_1 \sin \varphi$; $\Delta b_{x1} = -\Delta a_{x1} = \Delta x_1 \sin \varphi$; $\Delta h_{x1} = -0,5 \Delta x_1 \cos \varphi$, где Δx_1 — величина смещения вершины рассматриваемого резца в направлении движения подачи относительно расчетного положения. Знак (+) — при смещении в направлении подачи, знак (–) — в противоположном направлении.

Общая погрешность геометрических параметров оребрения от неточности позиционирования вершины рассматриваемого инструмента как в радиальном, так и в осевом направлениях, составит:

$$\Delta a_1 = -(\Delta t_1 \cos \varphi + \Delta x_1 \sin \varphi);$$

$$\Delta b_1 = \Delta t_1 \cos \varphi + \Delta x_1 \sin \varphi;$$

$$\Delta h_1 = -\left[\Delta t_1 \left(\frac{3}{2 \sin \varphi} - \frac{\sin \varphi}{2} \right) \right] + \frac{\Delta x_1}{2} \cos \varphi.$$

Используя аналогичный подход, получили выражения для погрешности получаемого оребрения

в зависимости от погрешностей установки предыдущего резца. Эти отклонения идентичны по величине и противоположны по знаку рассмотренным выше.

Для общего случая многоинструментальной обработки на геометрические погрешности формируемого ребра оказывают влияние погрешности установки только рассматриваемого и предыдущего резца. Все остальные резцы не влияют на параметры формируемого ребра. Общие выражения для погрешности параметров оребрения для *i*-го ребра, формируемого *i*-м резцом следующие:

$$\Delta a_i = \cos \varphi (\Delta t_i - \Delta t_{i-1}) + \sin \varphi (\Delta x_i - \Delta x_{i-1});$$

$$\Delta b_i = \cos \varphi (\Delta t_{i-1} - \Delta t_i) + (1 - \sin \varphi) (\Delta x_{i-1} + \Delta x_i);$$

$$\Delta h_i = \left(\frac{3}{2 \sin \varphi} - \frac{\sin \varphi}{2} \right) (\Delta t_i - \Delta t_{i-1}) + \frac{\cos \varphi}{2} (\Delta x_i - \Delta x_{i-1}),$$

где индекс (*i* – 1) присвоен погрешностям установки предыдущего инструмента.

Таким образом, зная погрешности установки каждого из инструментов в радиальном и осевом направлениях, можно определить все погрешности геометрических параметров оребрения для каждого ребра при любом числе одновременно работающих инструментов.

Рассмотрим степень влияния погрешностей установки инструментов на погрешности получаемых толщины и высоты ребра, ширины межреберного зазора на примере получения оребрения с шириной межреберного зазора равного шагу. Для получения такого оребрения требуется использование инструмента с главным углом в плане $\varphi = 30^\circ$ [8].

На толщину ребра и ширину межреберного зазора в наибольшей степени оказывает влияние погрешность установки по глубине резания вершин соседних инструментов, при этом коэффициент влияния для инструмента с углом $\varphi = 30^\circ$ составляет 0,86. Погрешность установки в осевом направлении имеет коэффициент влияния 0,5.

Аналогично на высоту ребра влияет погрешность установки вершин соседних инструментов в радиальном направлении. Радиальное смещение вершин двух резцов (погрешность по глубине резания) отражается на величине разновысотности ребер с увеличением в 2,75 раза. Например, погрешность установки каждого из соседних резцов всего на 0,1 мм приведет к разновысотности соседних ребер на 0,55 мм. Осевое смещение соседних резцов мало влияет на погрешность высоты ребра (коэффициент 0,43).

Полученные зависимости также могут быть использованы для решения обратной задачи, когда по требуемой точности получаемого оребрения необходимо установить точность взаиморасположения инструментов.

В некоторых случаях целесообразно получить оребрение на трубах с геометрически неравномерной структурой по шагу и высоте ребер между заходами. Это, например, актуально для конденсационно-испарительных аппаратов, предназначенных для эксплуатации как в режиме конденсации, так и в режимах испарения теплоносителей. В них оптимальная высота ребра и межреберный зазор для процессов кипения и конденсации не совпадают по своим значениям и могут быть получены для разных заходов оребрения. В этом случае приведенные выше зависимости позволяют рассчитать необходимое радиальное и(или) осевое смещение вершин инструментов.

Варианты трехзаходного оребрения, полученного на установке оребрения труб, показаны на рис. 6. Разношаговость и разновысотность ребер для соседних заходов не превышают 5 %, что допустимо для оребрения труб теплообменного назначения.

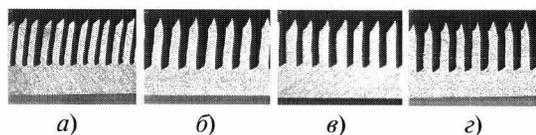


Рис. 6. Профили трехзаходного оребрения, полученного на установке для оребрения труб из разных материалов: *a* — медь М1, шаг 0,28 мм, высота ребра 1,13 мм; *б* — мельхиор МНЖМц 10-1-1, шаг 0,41 мм, высота ребра 1,06 мм; *в* — медь М1, шаг 0,42 мм, высота ребра 1,4 мм; *г* — мельхиор МНЖМц30-0,8-1, шаг 0,4 мм, высота ребра 1,3 мм

Описанный выше подход при решении задачи погрешности установки резцов позволяет определить максимально допустимую скорость врезания инструмента при ДР в случае как одно-, так и многоинструментальной обработки. Скорость врезания при ДР имеет ограничения. Это обусловлено не только недопустимым уменьшением кинематических задних углов, как при обычном резании, но и ограничениями по допустимой толщине подрезаемого слоя, которая увеличивается при врезании инструмента при ДР.

Возможен вариант, когда при врезании толщина подрезаемого слоя станет равной величине осевой подачи инструмента. В этом случае ширина

межреберного зазора становится равной нулю и подрезаемый слой не будет иметь возможности отгибаться в ранее образованную канавку. Подрезанный слой будет вынужден выдавливаться на обработанную поверхность, что приведет к недопустимым нагрузкам на режущий клин и к его поломке.

Задача определения максимально допустимой скорости врезания инструмента для ДР актуальна как для проектирования механизма радиальной подачи резцов установки оребрения труб, так и при использовании обычных токарных станков с ЧПУ для осуществления процесса ДР.

Рассмотрим случай многоинструментальной обработки, когда все резцы установлены без погрешностей и имеют одинаковую величину осевой подачи s_z на оборот. При наличии радиальной подачи вершина рассматриваемого инструмента сместится в радиальном направлении на величину $s_{rz} = s_{rc}/z$, где z — число инструментов. Принимая численно погрешность Δt , равную s_{rz} , запишем выражение для увеличения толщины срезаемого слоя, численно равного уменьшению ширины межреберного зазора: $\Delta a = -\Delta b = s_{rz}\cos\varphi$. Ширина межреберного зазора в этом случае составит: $b = s_z(1 - \sin\varphi) - s_{rz}\cos\varphi$.

Поскольку предельная величина радиальной подачи резца s_{rz} лимитируется условием $b \geq 0$, то, исходя из этого, радиальная подача на зуб не должна превышать: $s_{rz} \leq [s_z(1 - \sin\varphi)]/\cos\varphi$. Например при $\varphi = 30^\circ$ и получении оребрения с шагом $s_0 = 0,6$ мм при трехинструментальной обработке, величина радиальной подачи s_{rz} при врезании не должна превышать 0,35 мм/об. Для одноинструментальной обработки аналогично получаем: $s_r \leq [s_0(1 - \sin\varphi)]/\cos\varphi$.

Обобщая, можно утверждать, что соотношение скоростей радиальной и осевой подачи, как при одно-, так и при многоинструментальной обработке не должно превышать: $v_r/v_o \leq (1 - \sin\varphi)/\cos\varphi$.

Выводы

1. Обоснована и апробирована кинематическая схема установки для оребрения длинномерных труб методом деформирующего резания на основе главного вращательного движения трех инструментов вокруг трубной заготовки при вспомогательном движении подачи трубной заготовки вдоль своей оси.

2. Разработана специализированная установка для формирования наружного трехзаходного ореб-

рения на трубах теплообменных аппаратов с производительностью четыре метра оребренной трубы в минуту (при шаге оребрения 0,82 мм).

3. Для схемы многоинструментальной реализации ДР сформулированы требования по точности взаиморасположения вершин режущих-деформирующих инструментов, обеспечивающие заданную точность получаемого оребрения.

4. Установлены ограничения на скорость врезания инструмента при деформирующем резании.

Список литературы

1. **Курпан Т.** Heat Exchanger Design Handbook. — CRC Press, 2013. — 1260 p.
2. **Пат. 2044606 РФ, МПК 6 В 23 В 1/00, 27/00.** Способ получения поверхностей с чередующимися выступами и впадинами и инструмент для его реализации / Зубков Н. Н., Овчинников А. И., заявитель и патентообладатель Зубков Н. Н., Овчинников А. И., заявл. 30.04.1993; опубл. 29.09.1995 // Изобретения. — № 27.

3. **Зубков Н. Н.** Оребрение труб теплообменных аппаратов подрезанием и отгибкой поверхностных слоев // Новости теплоснабжения. — 2005. — № 4. — С. 51–53.

4. **Ельчинов В. П., Митин Е. В.** Новые нержавеющие кожухотрубные конденсаторы водяного охлаждения: сочетание эффективности и надежности // Холодильный Бизнес. — 2014. — № 1. — С. 16–22.

5. **Позняк В. Е., Савельев В. Н., Горбачев К. С.** Исследование и создание эффективных испарителей криогенных установок из оребренных труб // Теплофизика высоких температур. — 1992. — Т. 30. — № 3. — С. 615–620.

6. **Чернов Н. С., Зубков Н. Н.** Новый способ изготовления змеевиков из оребренных труб для теплообменных аппаратов технологического оборудования // Автомобильная промышленность. — 2005. — № 1. — С. 25–27.

7. **Зубков Н. Н.** Разработка и исследование метода деформирующего резания как способа формообразования развитых макрорельефов [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01, 05.02.08: защищена 25.12.2001; утв. 15.03.2002 / Зубков Николай Николаевич. — М., 2001. — 478 с. — Библиогр.: с. 396–414.

8. **Зубков Н. Н.** Особенности реализации метода деформирующего резания // Технология машиностроения. — 2001. — № 1. — С. 19–26.

УДК 621.91.02

Применение теории подобия и анализа размерностей для исследования параметров процессов лезвийной обработки конструкционных материалов

д.т.н. Ю. П. Сердобинцев¹, к.т.н. Е. Г. Крылов¹, к.т.н. А. М. Макаров¹,
к.т.н. В. Г. Барabanов¹, Н. В. Козловцева²

// ¹ Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ), 400005, г. Волгоград, пр-кт им. В. И. Ленина, д. 28;

² Московский государственный технологический университет «Станкин», 125055, г. Москва, Вадковский пер., д. 3а. E-mail: app@vstu.ru

Аннотация. В статье на основе принципов теории подобия и анализа размерностей описана методика исследования, целью которой является сокращение объемов испытаний и повышение достоверности информации о параметрах процессов лезвийной обработки новых конструкционных материалов. **Ключевые слова:** теория подобия; анализ размерностей; автоматизированное; диспергирование; безразмерный комплекс.

Abstract. The article describes a method on the basis of the principles of similarity theory and dimensional analysis, which aims to reduce the volume of testing and improving the reliability of information on the process parameters of the cutting new construction materials. **Keywords:** similarity theory; dimensional analysis; automotive styling; dispersion; dimensionless complex.

Исследованиями [1] установлено, что многие рекомендации по выбору рациональных режимов обработки, марки инструментального материала и типа режущего инструмента (РИ) для обработки современных материалов (полимеров, композитов,

керамики, высокопрочных и тугоплавких сплавов), применяемых в изделиях электротехнической, приборостроительной и химической промышленности ограничены и зачастую требуют проверки и коррекции в конкретных технологических условиях.

В литературе [2] рекомендуется использовать табличный способ определения параметров обработки, сущность которого заключается в выборе некоторого рационального значения параметра (точки в многомерном пространстве состояний технологической системы) и умножения его на ряд поправочных коэффициентов.

Такой подход, обладая простотой расчета и возможностью автоматизации, приводит к существенным ошибкам в прогнозируемой стойкости РИ и отклонениям от требований к качеству и точности