

**В. А. Маковой /к. т. н./, П. Ю. Проценко,  
В. С. Мельник**  
Национальный технический университет  
Украины «Киевский политехнический институт»

## Производство винтообразных труб теплообменников обкаткой роликами

*Разработаны технологии, а также проведено экспериментальное изготовление на токарно-винторезном станке винтообразных труб теплообменников по нескольким схемам обкатки роликами. Однозаходные трубы изготавливались по следующим схемам: с применением профилированной оправки, с использованием сыпучего материала вместо оправки, профилирование без оправки. Трехзаходные трубы изготавливались по схеме с использованием трехроликковой обкатной головки. Выполнено моделирование нескольких вариантов обкатки роликом одно- и трехзаходных канавок на трубе с использованием программного пакета Deform 3D. Проведена оценка влияния параметров обкатки (диаметра ролика  $D_p$ , шага винтовой оправки  $k$ , частоты вращения оправки с трубой  $n$ ) на формирование винтовых канавок. Установлено, что наибольшее влияние на напряженно-деформированное состояние в процессе производства таких труб оказывает соотношение глубины формируемой винтообразной канавки  $h$  к шагу винтовой оправки  $k$ . (Ил. 8. Библиогр.: 6 назв.)*

**Ключевые слова:** обкатка роликом, одно- и трехзаходные винтообразные трубы, напряженно-деформированное состояние, трехроликковая обкатная головка.

*Developed technologies and an experimental production to screw-cutting lathe of helical heat exchanger tubes were conducted in several roller spinning schemes. The one-start helical tube was made by the following scheme: using profiled mandrel, using bulk material instead of the mandrel, profiling without mandrel and bulk material. The three-start helical tube manufactured using three-roll spinning-head. The simulation of several options roller spinning one- and three-start helical groove on the tube using a software package Deform 3D was conducted. The effect of various parameters (diameter roller  $D_p$ , screw pitch of the mandrel  $k$ , groove depth  $h$ , frequency of rotation of the mandrel  $n$ ) on the formation of helical grooves on the tube was investigated. It was found that the greatest influence on the stress-strain state in the process of production of such tubes is the ratio of grooves depth  $h$  to screw pitch of the mandrel  $k$ .*

**Key words:** roller spinning; one- and three-start helical tube; stress-strain state; three-roll spinning-head.

### Вступление

Интенсификация теплообмена в каналах является эффективным методом уменьшения габаритных размеров и металлоемкости теплообменных аппаратов. При разработке новых теплообменных аппаратов, как правило, пытаются достичь высокой интенсивности теплопередачи при минимальных затратах энергии на прокачку теплоносителя [1]. Анализ работ в этом направлении показывает, что наиболее эффективными оказались винтообразные трубы с равноразвитой поверхностью теплообмена [2]. Массового производства таких труб в настоящее время нет.

Увеличить турбулизацию потока теплоносителя можно также при использовании обычных винтообразных труб, которые изготавливают методом роликовой обкатки. Известно много запатентованных способов и устройств изготовления винтообразных труб обкаткой роликами, большинство из которых подобны. Они заключаются в профилировании вращающейся

на оправке трубы роликом, который формирует винтообразные канавки на трубе, используя винтообразный профиль оправки [3].

### Цель работы

Разработка технологии массового производства одно- и трехзаходных винтообразных труб обкаткой роликами с использованием оправки и без неё, исследование влияния параметров обкатки (диаметра ролика  $D_p$ , шага винта оправки  $k$ , частоты вращения оправки  $n$ , количества винтообразных канавок на оправке  $j$ ). Исследовалась возможность получения максимальной глубины  $h$  винтообразной канавки без разрушения.

Винтообразные трубы изготавливались с использованием следующих схем реализации этого способа:

**1. Производство винтообразных труб роликовой обкаткой на токарно-винторезном станке с использованием оправки и ролика.** Схема процесса показана на рис. 1а. На оправку 1 надевают трубу 2. В экспериментальных

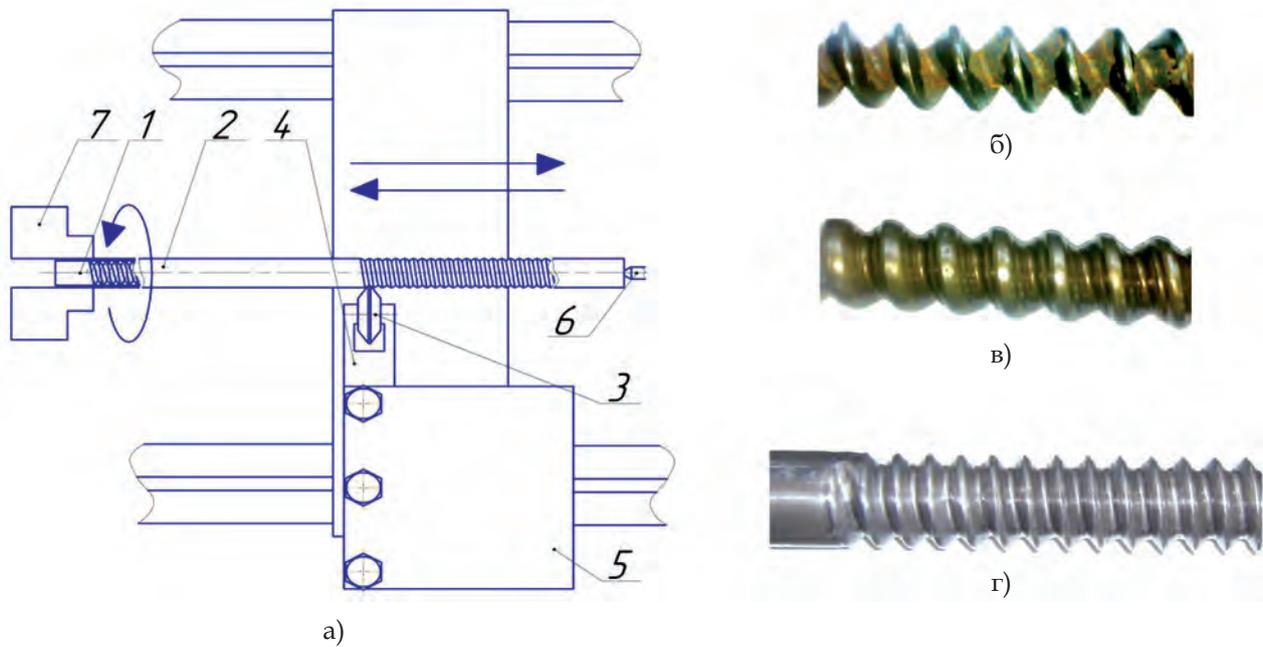


Рис. 1. Схема процесса однорوليковой обкатки винтообразной канавки на трубе (а) и фотографии: б) – оправка, в) – труба с шагом винта 20 мм, г) – труба с шагом винта 12 мм

исследованиях использовалась труба из нержавеющей стали AISI 304 диаметром (внешним)  $D_{mp} = 38$  мм и толщиной 1 мм. Ролик 3 крепится к корпусу 4, который установлен в резцедержателе 5 токарного станка. Оправку 1, с надетой на неё трубой 2, фиксировали с одной стороны центром задней бабки станка 6, а с другой – кулачками 7 трехкулачкового патрона станка, чем обеспечили невозможность вращения трубы относительно оправки. Оправка имеет винтовой рельеф (рис. 1б), который будет получать труба после процесса обкатки. Полученные образцы труб показаны на рис. 1 в–г.

Экспериментальное изготовление винтообразных труб по этой схеме происходило в несколько этапов до получения канавок глубиной  $h = 4,5$  мм. Вначале, при формировании канавок глубиной  $h = 2$  мм использовался ролик с тупым углом профиля ( $100^\circ$ ) и радиусом скругления кромки  $r = 3$  мм. Финишные операции при формировании окончательных канавок глубиной  $h = 4,5$  мм выполнялись роликом с острым углом профиля ( $70^\circ$ ) и таким же радиусом скругления кромки  $r = 3$  мм. При этом процесс деформирования выполнялся несколько раз с проходом ролика в одну и в другую сторону, до момента формирования конечного винтообразного профиля на трубе.

Для создания оптимальной технологии обкатки, а также разработки оснастки проводилось численное моделирование и сравнение процессов обкатки роликами трубы однозаходным и многозаходным способами [4; 5]. Для этого моделировалась обкатка следующих винто-

образных труб с одинаковой шириной всех канавок: однозаходной с шагом 8 мм, трехзаходной с шагом 24 мм. Моделирование выполнялось в программном пакете Deform 3D, который был временно предоставлен компанией «Тетрис» (г. Москва). Труба разбивалась сеткой тетраэдрических конечных элементов. В этих моделях процессов использовалась труба диаметром  $D_{mp} = 38$  мм с толщиной стенки  $S = 1$  мм. Коэффициент трения составлял 0,1. В программу задавалась кривая упрочнения нержавеющей стали AISI 304, которая показана на рис. 2а. Оправка в каждом случае моделирования вращалась с частотой вращения  $n = 160$  об/мин в направлении, противоположном вращению роликов.

Процесс численного моделирования в указанных случаях происходил за несколько этапов [5].

На первом этапе моделирования обкатки винтообразной трубы, ролик или ролики вдавливаются в трубу на глубину  $h = 2$  мм, в дальнейшем – на 3,5 мм и на последних этапах – на 4,3 мм. При этом формирование канавок глубиной 3,5 мм на трубе происходило после получения канавки глубиной 2 мм, а формирование канавки глубиной 4,3 мм – после получения канавки глубиной 3,5 мм. То есть формирование винтообразной трубы происходило путем чередования этапов вдавливания роликов в неподвижную трубу и этапов ее обкатки. Эти два этапа соответствуют одному проходу роликов. Более подробно этапы моделирования винтообразной трубы описаны в работе [5].

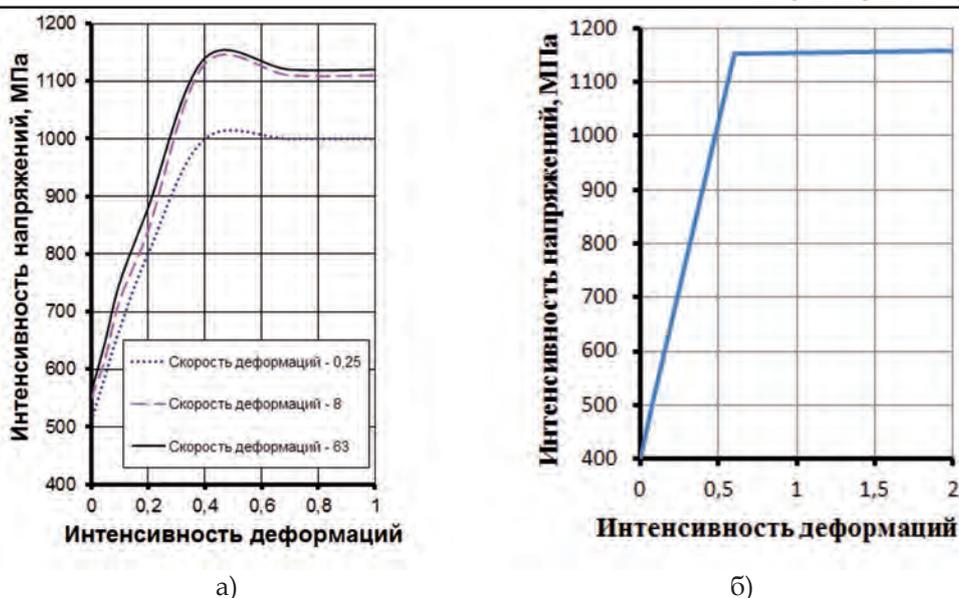


Рис. 2. Кривые упрочнения:  
а) – сталь AISI 304, б) – сталь AISI 321

Анализ первоочередного этапа моделирования (вдавливание ролика в неподвижную трубу) показывает, что в данном случае в локальной ячейке деформации реализуется напряженно-деформированное состояние (НДС), которое состоит: из двух главных растягивающих напряжений ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) и напряжения сжатия  $\sigma_3$ , величина которого близка к нулю; двух главных деформаций растяжения  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  ( $\varepsilon_2$  близка к нулю), а также деформации сжатия  $\varepsilon_3$ . Уже на данном этапе создается неблагоприятная схема НДС, что не позволяет формировать винтообразные трубы с глубокими канавками  $h/D_{mp} \geq 0,15$  ( $h/k \geq 0,4$ ). Распределение интенсивности напряжений  $\sigma_i$  и деформаций  $\varepsilon_i$  на этапе вдавливания ролика в трубу дает возможность выделить две зоны интенсивного течения металла [4; 5]. Первая зона находится возле скругленных выступов оправки, вторая – возле скругленных краев ролика. В этих двух криволинейных зонах трубы напряженное состояние, как было сказано, близкое к двусосному растяжению. Напряжения, которые возникают в этих зонах, зависят от радиусов кривизны этих зон, зависящие от радиусов скруглений ролика и оправки. Таким образом, чем меньше эти радиусы скруглений, тем будут больше значения главных напряжений.

Моделирование второочередного этапа обкатки (при вращении трубы вокруг своей оси и движении роликов вдоль этой оси, в результате чего происходит формирование винтовых канавок на трубе) одно- и трехзаходных винтообразных труб с одинаковой шириной канавки показало, что значительной разницы в НДС при изготовлении таких изделий нет [4]. Количество формируемых винтовых канавок  $j$  на трубе не влияет на ее НДС.

Для оценки возможности разрушения трубы в процессе ее обкатки в программе использовался энергетический критерий разрушения Броззо, который основан на определении удельной работы формоизменения:

$$\int_0^{\varepsilon_K} \frac{\sigma_1}{\sigma_1 - \sigma} d\varepsilon_i = const = \psi, \quad (1)$$

где  $\sigma_1$  – максимальное главное напряжение;  $\varepsilon_i$  – интенсивность деформаций,  $\sigma$  – гидростатическое давление,  $\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ ;  $\varepsilon_K$  – критическая деформация.

Для оценки влияния параметров обкатки проведено численное моделирование обкатки трубы роликами разных диаметров ( $D_p = 25; 30; 38; 40; 45; 100; 150$  мм), с разной частотой вращения трубы ( $n = 50; 100; 160; 200; 250$  об/мин), с разным шагом винтовой оправки ( $k = 6; 8; 12; 20$  мм). На основе полученных результатов установлено влияние указанных параметров на максимальные величины интенсивности напряжений  $\sigma_i$ , интенсивности деформации  $\varepsilon_i$  и критерия Броззо. Установлено, что на внутренней поверхности трубы значения интенсивностей напряжений, деформаций и величины критерия Броззо больше на 8...10 %, чем на внешней. Наибольшее влияние на НДС в процессе производства таких труб оказывает шаг винтовой оправки  $k$ , и чем он больше, тем более глубокую канавку можно сформировать на трубе. Желательно, чтобы соотношение между глубиной канавки  $h$  и шагом  $k$  ( $h/k$  – относительная глубина канавки) было не больше  $h/k \leq 0,4$  (рис. 3). Частота вращения оправки  $n$  незначительно влияет на процесс роликовой обкатки винтообразной трубы. Установлено, что оптимальной ве-

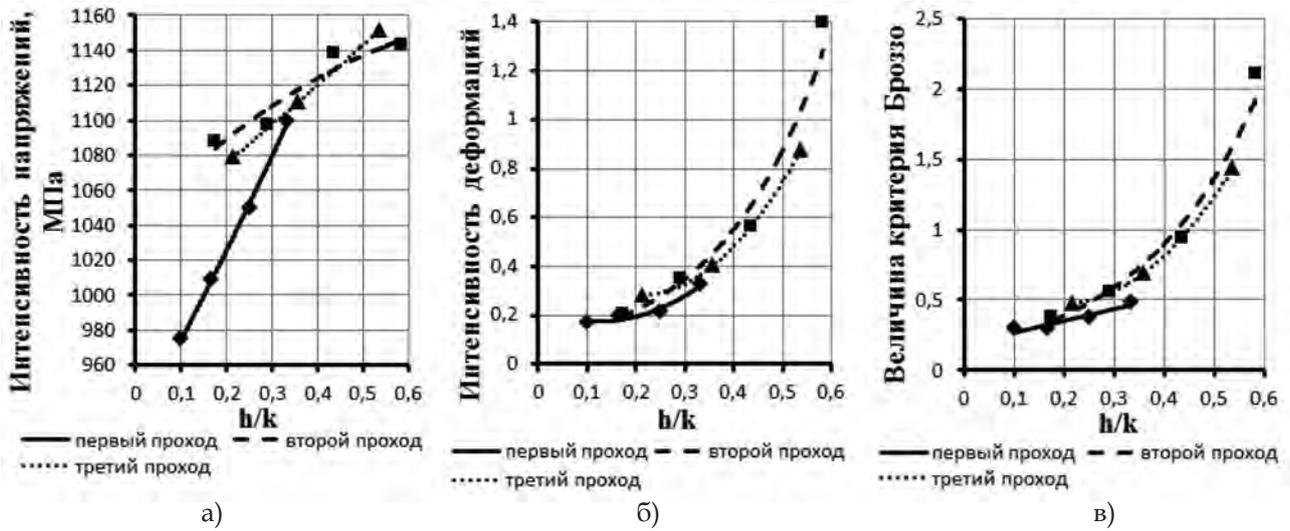


Рис. 3. Влияние (при разном количестве проходов роликов)

величины соотношения глубины канавки  $h$ , которая формируется на трубе, к шагу однозаходной винтовой оправки  $k$  (относительная глубина канавки) на максимальные величины:

а) – интенсивности напряжений, б) – интенсивности деформаций, в) – величины критерия Брэнно

величиной соотношения диаметра ролика к диаметру трубы является  $D_p/D_{тр} = 3$ .

Численным моделированием получено распределение изолиний интенсивности напряжений в локальной зоне деформации при обкатке острым роликом (рис. 4а) кольцевой канавки на трубе, состоящей из материала AISI 321 (см. рис. 2б). Таким же образом получено распределение изолиний интенсивности напряжений при многороликовой обкатке кольцевой канавки на трубе из того же материала глубиной 4 мм роликами с разными радиусами скругления

(рис. 4 б–г). При этом установлено снижение интенсивностей напряжений и деформаций при многороликовой обкатке с использованием роликов разной остроты (рис. 5). За счет использования нескольких роликов с разными радиусами скругления, каждый из которых увеличивал глубину канавки, сформированную предыдущим роликом, больше материала трубы было вовлечено в процесс деформирования.

Исходя из экспериментальных исследований и результатов численного моделирования в программе Deform 3D установлено, что процесс

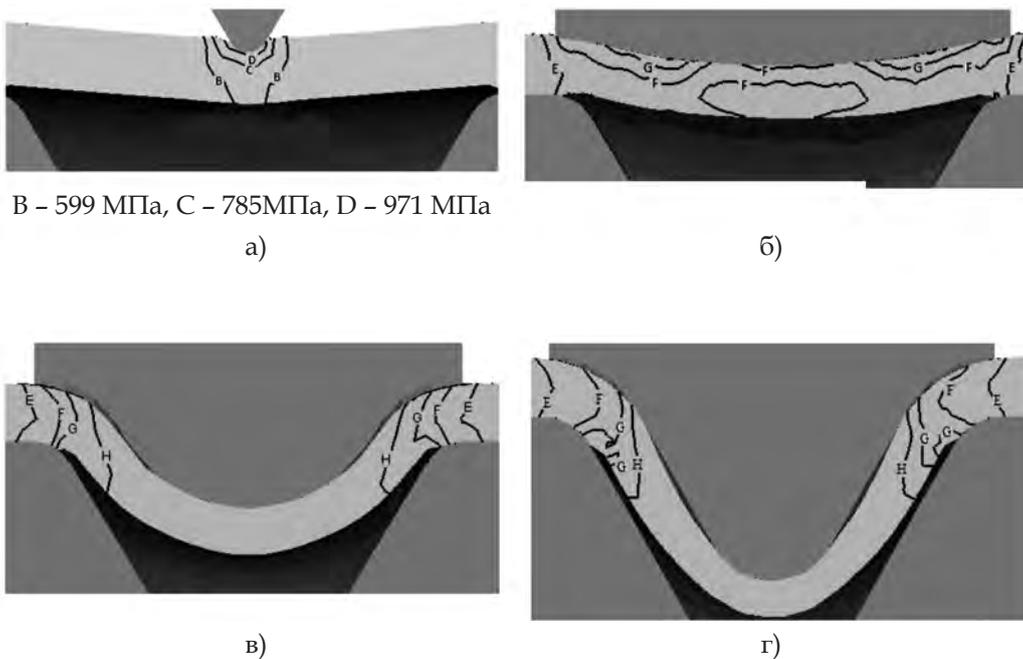


Рис. 4. Распределение интенсивности напряжений в разрезах трубы при обкатке острым роликом (а) и при многороликовой обкатке (Е–663 МПа, F–829 МПа, G–995 МПа, H–1160 МПа):

б) – глубина канавки 0,5 мм; в) – глубина 2,5 мм; г) – глубина 4 мм

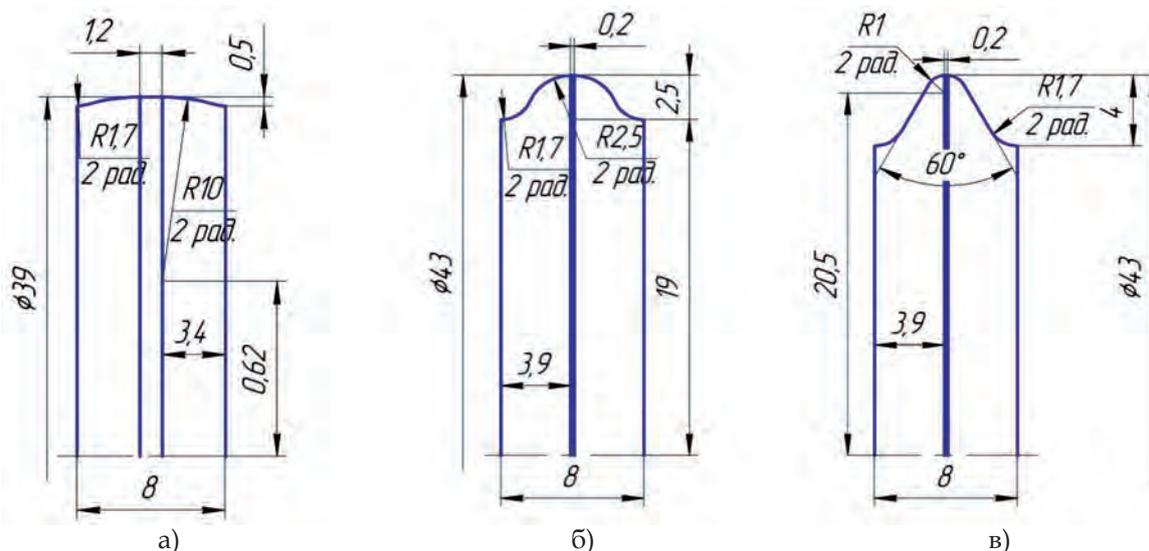


Рис. 5. Чертежи роликов, которые использовались при многороликовой обкатке:

а) – для формирования канавки глубиной 0,5 мм, б) – для увеличения глубины канавки до 2,5 мм, в) – для увеличения глубины канавки до 4 мм

обкатки винтообразной трубы с относительной глубиной канавки  $h/k \geq 0,25$  и соотношением  $h/D_{mp} \geq 0,05$  лучше выполнять за несколько этапов (два или три прохода роликов), в каждом из которых будут задействованы ролики с различной геометрией. Вначале, при формировании канавок с относительной глубиной  $h/k \leq 0,25$  и соотношением  $h/D_{mp} \leq 0,05$ , желательно использовать ролик с тупым углом профиля ( $>90^\circ$ ) и относительным радиусом скругления кромки  $r/k \geq 0,25$ . Финишные операции, при формировании окончательных канавок с относительной глубиной  $0,4 \geq h/k \geq 0,25$  и соотношением  $h/D_{mp} \geq 0,05$ , выполнять роликом с острым углом профиля ( $<90^\circ$ ) и относительным радиусом скругления кромки, который должен быть не меньше  $r/k \geq 0,05$  (в зависимости от угла профиля канавки оправки).

В процессе обкатки может возникнуть винтовая трещина на дне впадины винтовой канавки трубы, формирующаяся вследствие исчерпания пластичности материала.

**2. Изготовление винтообразных труб роликовой обкаткой на токарно-винторезном станке с использованием сыпучей среды вместо оправки.** Оправка является технологически сложной деталью. Также после процесса формирования винтообразного профиля возникают трудности в снятии с неё готовой трубы. Поэтому для упрощения технологии изготовления возникает необходимость разработки схемы получения винтообразной трубы без использования оправки.

Использование сыпучих материалов является альтернативой оправки [6], а также обеспечивает возможность создания противодействия в

середине трубы. Схема процесса изготовления винтообразной трубы роликовой обкаткой с использованием сыпучей среды вместо оправки показана на рис. 6а. В середину трубы 1 засыпается сыпучий материал 2, который состоит из песка и графита, а на концах в неё вставляют пробки 3, 4. Левая пробка 3 вместе с трубой 1 фиксируется кулачками 5 трёхкулачкового патрона станка. Правая пробка 4 вставляется в корпус 6, где на неё оказывает давление пружина 7. Сила давления пружины 7 регулируется крышкой 8, на которой есть отверстие, где устанавливается центр 9 задней бабки токарно-винторезного станка. Обкатка производится роликом 10, который установлен в обкатной головке 11, что крепится в резцедержателе 12 станка.

При обкатке роликом сыпучий материал вначале уплотняется, а потом начинает действовать на пробку, которая сжимает пружину, находящуюся в корпусе. С помощью этой схемы были получены образцы винтообразных труб с разным шагом винта, показанные на рис. 6 б–в.

**3. Изготовление трехзаходных винтообразных труб.** Для получения трехзаходных винтообразных труб был спроектирован и изготовлен экспериментальный вариант трехроликовой обкатной головки на базе трёхкулачкового токарного патрона, на кулачках которого крепятся ролики [4]. Обкатная головка крепится на суппорте токарно-винторезного станка.

Технология изготовления трехзаходных винтообразных труб реализуется следующим образом: винтообразная оправка с надетой на неё трубой крепится в патроне станка с одной стороны, а с другой подпирается центром задней бабки. Ролики выставляются по впадинам трех-

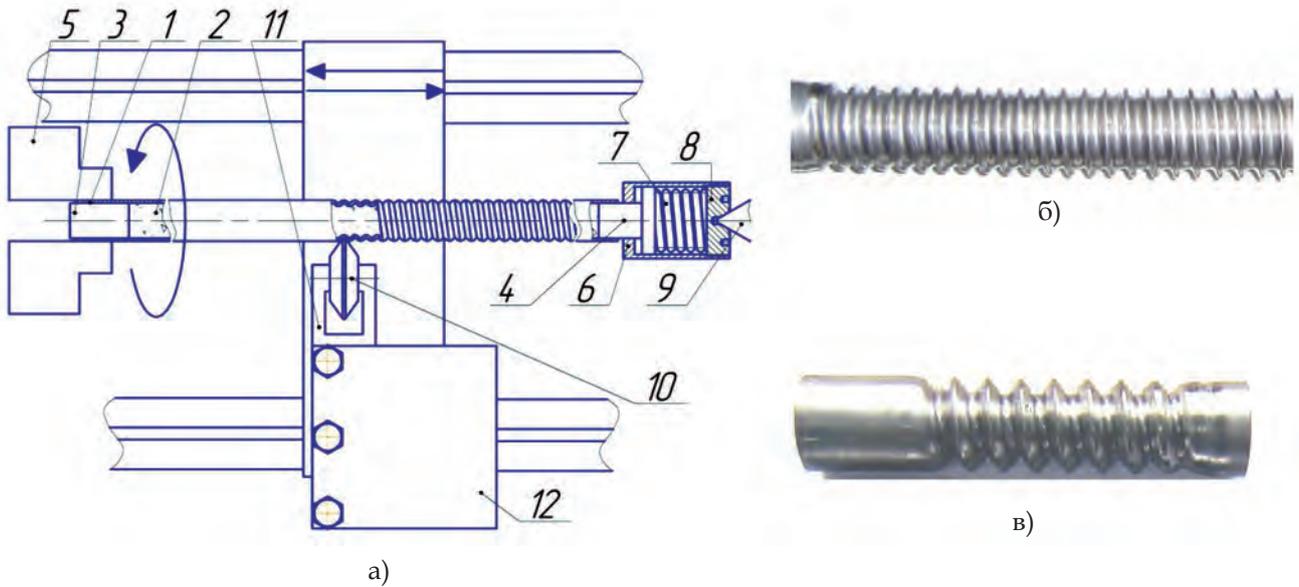


Рис. 6. Схема получения винтообразной трубы

с использованием сыпучего материала вместо оправки (а) и фотографии полученных труб:

б) – с шагом винта 8 мм; в) – с шагом винта 12 мм

заходной оправки, и их одновременно вдавливают в трубу на глубину 1,5–2,0 мм, после этого трубу вместе с оправкой начинают вращать, а трехроликую обкатную головку перемещают вдоль оси трубы. Перемещение трехроликowej обкатной головки выполняют с помощью кинематических связей станка, что позволяет жестко контролировать шаг перемещения. После первого прохода станок переключают в режим обратного хода, и обкатная головка возвращается в начальное положение. На следующем этапе ролики вдавливают в трубу на 1,0–1,5 мм и процесс обкатки повторяется. В дальнейшем производят несколько этапов деформирования до получения необходимой глубины канавки, после чего оправка с трубой снимается из станка, и труба скручивается с оправки.

Схема процесса обкатки с использованием трехроликowej обкатной головки показана на рис. 7а.

Трехроликowej обкатная головка состоит с трехкулачкового патрона 1, который крепится к плите 2 с помощью винтов, а плита, в свою очередь, крепится к опоре 3, что зафиксирована на суппорте станка. К кулачкам 4 трехкулачкового патрона 1 присоединены обкатные головки 5 с роликами 6. Жесткость конструкции увеличивает направляющая плита 7, имеющая пазы, с помощью которых дополнительно направляются обкатные головки 5. Направляющая плита 7 соединяется с опорой 3 при помощи винтов и плиты 8. Труба 9 вместе с оправкой 10 крепится в трехкулачковом патроне токарно-винторезного станка.

Обкатку трехзаходных винтообразных труб также можно выполнять без оправки, вместо нее

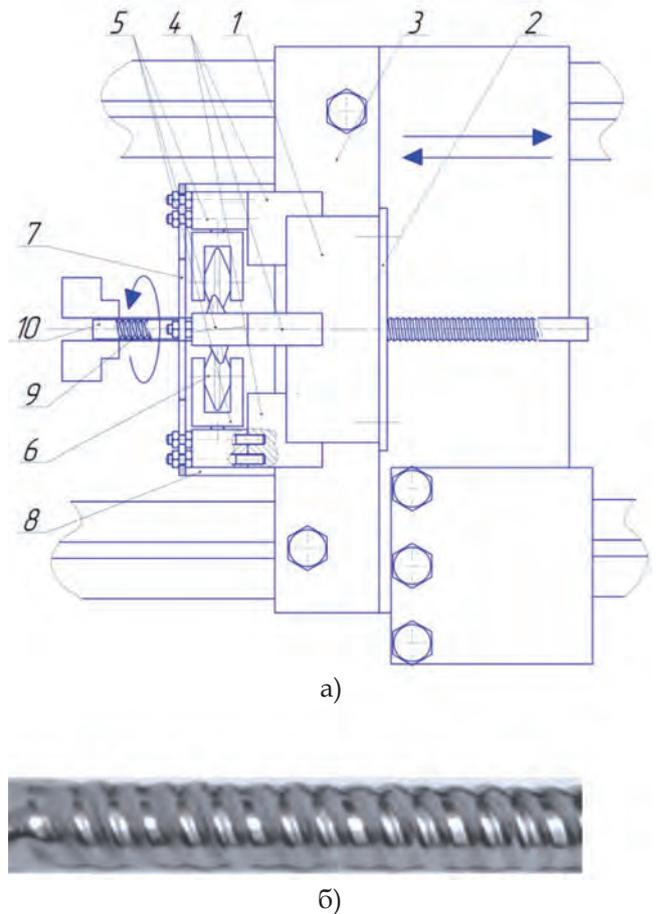


Рис. 7. Принципиальная схема работы оснастки с трехроликowej обкатной головкой (а)

и фотография трехзаходной винтообразной трубы, изготовленной без оправки (б)

используют сыпучую смесь (50 % песка и 50 % графита). На рис. 7б показана трехзаходная винтообразная труба, которая получена с использованием такой смеси.

**4. Технология безоправочного профилирования винтообразных труб двумя обкатными головками.** Опираясь на предыдущие исследования и разработанные технологии, была предложена схема профилирования длинномерных винтообразных латунных трубок с внешним диаметром 16 мм толщиной 1 мм без использования оправок или каких-либо наполнителей, что позволит снизить себестоимость изготовления таких труб и упростит их технологию изготовления. В качестве деформирующих инструментов использовались трехроликовая и однороликовая обкатные головки. Данная оснастка устанавливается на токарно-винторезном станке. Принципиальная схема работы этой оснастки показана на рис. 8а.

Оснастка содержит трехроликовую обкатную головку 7, которая крепится на суппорте токарно-винторезного станка, и однороликовую обкатную головку 4, которая крепится к резцедержателю 8 этого станка. Трубу 1 размещают между роликами 5 головки 7 и фиксируют стержнем-удлинителем 2, который крепит-

ся в патроне станка кулачками 3. Так как области деформирования трехроликовой обкатной головки 7 и однороликовой обкатной головки 4 находятся на значительном расстоянии, необходимо использовать стержень-удлиннитель 2, который позволяет минимизировать отход и предотвращает скручивание трубы. Для предотвращения прогиба трубы в процессе профилирования используется упор 6. Труба, полученная по данной технологии, представлена на рис. 8б.

#### Выводы

1. В процессе производства винтообразных труб наибольшее влияние на НДС оказывает шаг винтовой оправки  $k$ , и чем он больше (больше ширина канавки), тем более глубокую канавку можно сформировать на трубе. Желательно, чтобы соотношение между глубиной  $h$  формируемой канавки на трубе и шагом  $k$  было не больше  $h/k \leq 0,4$ , при этом  $h/D_{mp} \leq 0,15$ . Различия между НДС при формировании одно- и многозаходной винтообразных труб с канавками одинаковой ширины незначительны. Частота вращения оправки  $n$  мало влияет на процесс роликовой обкатки винтообразной трубы. Установлено, что оптимальной величиной соотношения диаметра ролика к диаметру трубы является  $D_p/D_{mp} = 3$ , что позволяет уменьшить деформацию стенки трубы и снизить возможность возникновения винтовой трещины в процессе изготовления.

2. Установлена возможность изготовления качественных винтообразных профилей глубиной до 1,5 мм за один проход на трубках теплообменников из латуни с внешним диаметром 16 мм и толщиной стенки 1 мм, что является достаточным для увеличения теплопередачи на 30...50 %.

3. Разработана технология и оснастка для профилирования труб с использованием трехроликовой обкатной головки.

4. Установлено, что формирование винтовых канавок на трубе осуществляется за счет локального пластического деформирования и утонения ее стенки. Общее увеличение твердости на впадинах витков канавок может достигать 50 % ( $h/k = 0,56$ ). При исчерпании запаса пластичности материала возникает винтовая трещина во впадинах канавки.

#### Библиографический список

1. Багрий П. И. Испытания опытного образца модуля воздушного охладителя / П. И. Багрий, Н. Н. Литвиненко, Ю. Е. Николаенко, А. В. Семеняко, А. М. Терех // Промышленная теплотехника. – 2008. – № 2. – С. 13–20.

2. Демчук Л. В. Теплоаеродинамічна ефективність гвинтоподібних труб з рівнорозвиненою

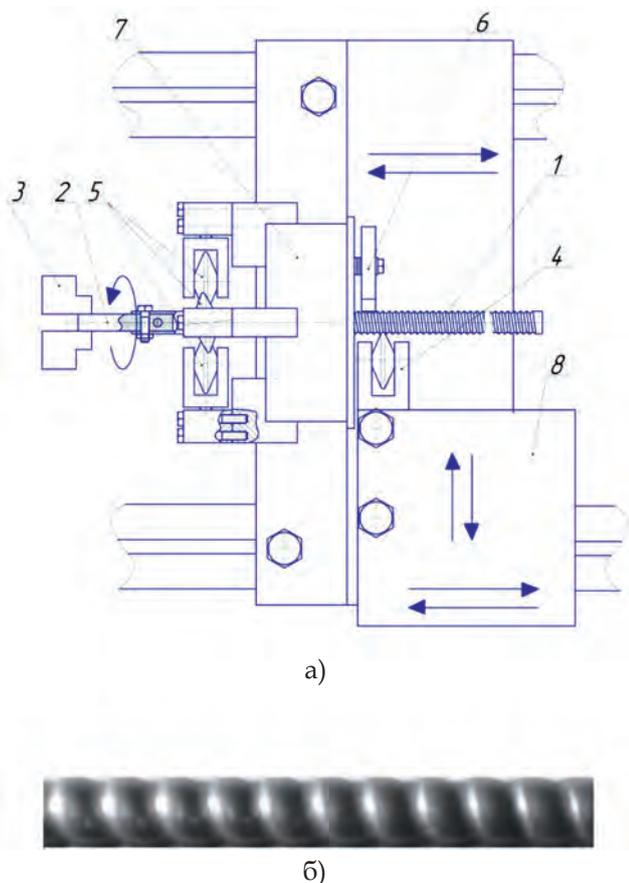


Рис. 8. Принципиальная схема работы оснастки с двумя обкатными головками (а) и фотография полученной трубы (б)

поверхнею / Л. В. Демчук, В. А. Рогачов, О. М. Терех, О. И. Руденко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 5/8 (53). – С. 26–29.

3. Патент на изобретение РФ 2152837. Способ изготовления труб с винтовыми гофрами и устройство для его осуществления; В21D 15/04 / В. Б. Соколов, А. Н. Шляхин, И. Н. Лыткин, А. А. Мишулин, Н. Н. Грунин. – № 99112837/02; Заявл. 15.06.1999; Опубл. 20.07.2000, Бюл. № 20. – 2 с.

4. Маковей В. О. Особливості профілювання одно та трьохзахідних гвинтоподібних труб / В. О. Маковей, П. Ю. Проценко // Вестник

Национального технического университета «ХПИ». – 2013. – С. 153–162.

5. Маковей В. А. Исследование локального деформирования трубы при профилировании винтовых канавок / В. А. Маковей, П. Ю. Проценко // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2011. – № 46. – С. 107–115.

6. Марьин С. Б. Изготовление элементов трубопроводов из трубчатых заготовок с применением эластичных и сыпучих сред / С. Б. Марьин // Кузнечно-штамповочное производство. – 2009. – № 10. – С. 24–28.

Поступила 11.12.2015



К 125-летию Нижнеднепровского трубопрокатного завода

УДК 621.774.36

Производство

Б. Г. Павловский /к. т. н./, С. Л. Стасевский,  
Ю. Д. Угрюмов /к. т. н./  
ГП «Укрگیпромез»

А. Ф. Гринев /к. т. н./  
ООО «НИИ «Укрметаллургинформ»

## Определение технологической обрезки на пилигримовых станах и прогнозирование ее уменьшения

*Рассмотрены потери металла при производстве труб на пилигримовом агрегате. Разработана методика определения массы технологической обрезки на пильгерстане в затравку и пильгерголовку. Выполнены расчеты потерь металла при прокатке труб из круглой непрерывнолитой заготовки, на основе которых сделан прогноз снижения этих потерь за счет использования новых технических решений. (Ил. 10. Библиогр.: 9 назв.)*

**Ключевые слова:** трубы, пилигримовый стан, технологическая обрезка, прогнозирование.

*Metal losses during pipe manufacture at pilger mill have been analyzed. Procedure has been developed to estimate mass of process cropping with dummy bars and pilger heads. Metal losses have been calculated for pipe rolling out of concast rounds. Based on calculations, forecast has been elaborated for reduction of the above losses due to employment of advanced technical solutions.*

**Key words:** pipe, pilger mill technological trimmings, forecasting.

### Введение

Технологическая обрезка на прокате включает потери металла в затравку и пильгерголовку; а в отделочной части цеха – потери металла на концевую обрезку холодных труб [1–3].

Вопросу совершенствования использования металла в трубопрокатных цехах Украины посвящена работа, выполненная ГП «НИТИ», «ВНИТИ-ТЕСТ» и ПАО «Интерпайп НТЗ» [4], где рассматриваются основные направления по-

иска резервов снижения потерь металла при горячей прокатке труб, в том числе на ТПА с пилигримовыми станами. При этом основное внимание уделяется анализу технологических отходов. Рассматриваются и мероприятия по снижению потерь производства при прокатке труб в плюсовом поле допуска и отгрузке по теоретической массе. Отмечается, что основным резервом снижения расхода металла является изготовление труб со средней толщиной стенки,