

УДК 621.983.3.001 – 621.983.7.004

Маковой В. А.  
Проценко П. Ю.  
Мельник В. С.

## ПРОФИЛИРОВАНИЕ ВИНТОВЫХ ТРУБ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ОБКАТКОЙ РОЛИКАМИ

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. Анализ работ в этом направлении показывает, что наиболее эффективными оказались винтообразные трубы с равноразвитой поверхностью теплообмена [1]. Массового производства в настоящее время нет.

Увеличить турбулизацию потока можно при использовании винтообразных труб, которые изготавливают методом роликовой обкатки. Известно много запатентованных способов и устройств изготовления винтообразных труб роликовой обкаткой, большинство из которых подобны [2]. Холодная деформация, которая возникает при обкатке, в значительной степени влияет на изменение физико-механических свойств металла. Происходит упрочнение металла, что увеличивает все его механические характеристики.

Целью работы является разработка технологии получения одно- и трёхзаходных винтообразных труб обкаткой с использованием оправки, так и без неё, исследование влияния параметров обкатки (диаметра ролика  $D_r$ , шага винтовой оправки  $k$ , частоты вращения оправки  $n$ ). При этом исследовалась возможность получения максимальной глубины винтовой канавки без разрушения.

Одним из возможных способов получения винтообразных труб является способ профилирования труб роликовой обкаткой. За счет своей простоты его часто используют на практике для профилирования тонкостенных труб. В качестве инструментов для получения винтового профиля на тонкостенной трубе чаще всего используются ролики и оправка.

В работе рассматривались следующие схемы профилирования винтообразных труб:

I. Получение винтовой трубы роликовой обкаткой на токарно-винторезном станке с использованием оправки и ролика. Оправка имеет винтовой рельеф (рис 1,а), который будет получать труба после процесса обкатки. Полученный образец трубы с шагом винта 20 мм показан на рис. 1,б. Эту технологию изготовления винтообразных труб необходимо проводить в несколько этапов. Вначале используется ролик с тупым углом ( $> 90^\circ$ ) и относительным радиусом скругления кромки  $r/k > 0,25$ . Финишные операции выполняются роликом с острым углом ( $< 90^\circ$ ) и относительным радиусом скругления кромки  $r/k > 0,05$ . При этом процесс деформирования нужно выполнять несколько раз, с проходом ролика в одну и другую сторону до момента, пока не сформируется конечный винтообразный профиль.

II. Получение винтовой трубы роликовой обкаткой на токарно-винторезном станке с использованием сыпучей среды вместо оправки. Оправка является технологически сложной деталью. После формирования винтообразного профиля с использованием оправки возникают трудности в снятии с неё готовой трубы. Поэтому для упрощения технологии изготовления возникает необходимость изменения схемы получения винтообразной трубы без использования оправки (рис. 2).

Использование сыпучих материалов является альтернативой оправки [3]. Они обеспечивают возможность создания противодавления в середине трубчатой заготовки.

Схема с использованием сыпучих материалов представлена на рис. 2. В середину трубы 1 засыпается сыпучий материал 2, который состоит из песка и графита, а на концах в неё вставляют пробки 3 и 4. Левая пробка 3 крепится в трёхкулачковом патроне 5. Правая пробка 4 вставляется в корпус 6, где на неё оказывает давление пружина 7. Сила давления пружины

ны регулируется крышкой 8, на которой есть отверстие, где крепится центр 9 задней бабки токарно-винторезного станка. Обкатка производится роликом 10, который установлен в обкатной головке 11. При обкатке роликом сыпучий материал 2 вначале уплотняется, а потом начинает действовать на пробку 4, которая сжимает пружину 7, находящуюся в корпусе 6.

С помощью этой схемы были получены образцы винтообразных труб с разным шагом. На рис. 1, в показан образец винтообразной трубы с шагом 8 мм, которая была получена по этой схеме. В качестве сыпучего материала использовался песок с графитом. Для получения данных труб использовались ролики с различной геометрией. Ролик был повернут на угол  $\alpha_{нов.}$ , этот угол зависит от шага винтовой канавки.



Рис. 1. Фотографии оправки и труб (а), полученных с оправкой (б) и без оправки (в)

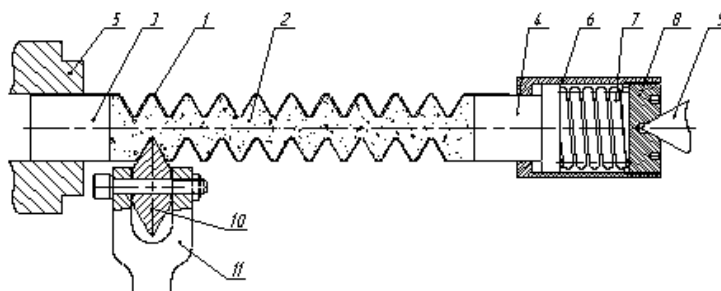


Рис. 2. Схема получения винтообразной трубы с использованием сыпучего материала в качестве внутреннего противодействия

III. Технология и оснастка для изготовления трехзаходных винтообразных труб. Для получения трехзаходных винтообразных труб было спроектирован и изготовлен экспериментальный вариант трехроликковой обкатной головки на базе трехкулачкового 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 трехзаходной оправке и их одновременно вдавливают в трубу на глубину 1,5–2,0 мм, после этого трубу вместе с оправкой начинают вращать, а трехроликковую обкатную головку перемещают вдоль оси трубы. Перемещение трехроликковой 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, и труба скручивается с оправки.

3D-модель обкатной головки показано на рис. 3. На рис. 4 показана фотография трехроликковой обкатной головки, которая установлена на станке. Трехроликковая обкатная головка состоит с трехкулачкового патрона 1, который крепится к плите 2 с помощью винтов, а плита, в свою очередь, крепится к опоре 3 тоже с помощью винтов. К кулачкам 4 трехкулачкового патрона 1 присоединены обкатные головки 5 с роликами 6. Жесткость конструкции увеличивает направляющая плита 7, на которой находятся пазы, с помощью которых дополнительно направляются обкатные головки 5. Направляющая плита 7 соединяется с опорой 3 при помощи винтов и плиты 8. Труба 9 надета на оправку 10 и крепится в трехкулачковом патроне токарно-винторезного станка, а с другой – подпирается центром задней бабки.

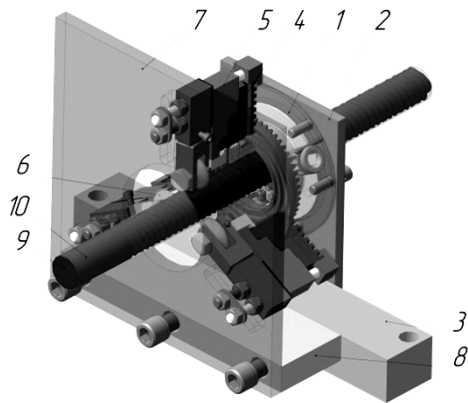


Рис. 3. 3D-модель трехроlikовой обкатной головки с трубой, надетой на оправку



Рис. 4. Трехроlikовая обкатная головка, которая установлена на станок

Обкатку трехзаходных винтообразных труб также можно выполнять без оправки, вместо оправки используют сыпучую смесь (50% песка и 50% графита).

IV. Технология безправочного профилирования винтообразных труб двумя обкатными головками. Опираясь на предыдущие исследования и разработанные технологии, было предложено схему профилирования винтообразных труб без использования оправок или наполнителей, что позволит снизить себестоимость изготовления таких труб и упростит технологию длиномерных винтообразных труб. В качестве деформирующих инструментов использовались трехроlikовая и однороlikовая обкатные головки. Данная оснастка устанавливается на токарно-винторезном станке 16К20. Фотография винтообразной трубы, полученной с использованием данной установки, представлена на рис. 5. Принципиальная схема работы этой установки показана на рис. 6.

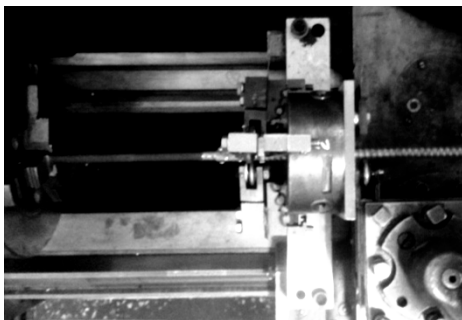


Рис. 5. Фотографии установки и полученной трубы без применения оправки

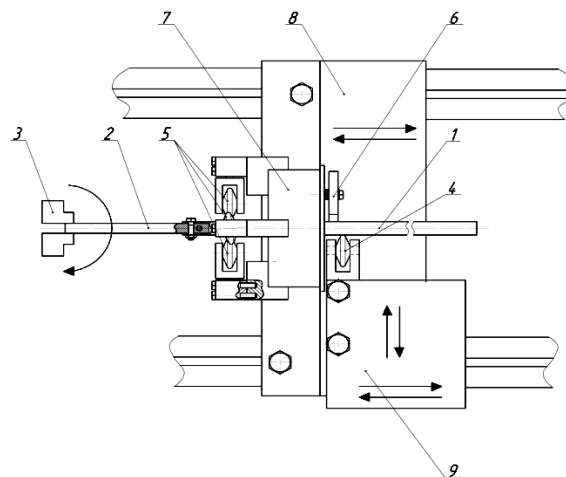


Рис. 6. Схема работы установки: 1 – труба – заготовка, 2 – стержень-удлинитель, 3 – патрон, 4 – однороlikовая обкатная головка, 5 – ролики, 6 – упор, 7 – трехроlikовая обкатная головка, 8 – суппорт станка, 9 – резцедержатель

Установка содержит трехроликую обкатную головку 7, которая крепится на суппорте 8 токарно-винторезного станка и однороликовую обкатную головку 4, которая крепится к резцедержателю 9 этого станка. Трубу 1 размещают между роликами 5 головки 7 и фиксируют стержнем-удлинителем 2, который фиксируется в патроне станка. Так как области деформирования трехроликовой обкатной головки 7 и однороликовой обкатной головки 4 находятся на значительном расстоянии, необходимо использовать стержень-удлинитель 2, который позволяет минимизировать отход.

После проведения ряда экспериментальных исследований проводилось численное моделирование процесса обкатки роликами трубы для создания оптимальной технологии получения трубы однозаходным и многозаходным способом, после чего производилось сравнение этих процессов [4, 5]. Моделирование выполнялось в программном пакете Deform-3D, который был временно предоставлен компанией «Тесис» г. Москва.

Модель процесса обкатки однозаходной винтообразной трубы в программе Deform-3D показано на рис. 7, а. Трубчатая заготовка 1 была разбита сеткой тетраэдрических конечных элементов. На рис. 7, б показана модель процесса трехроликовой обкатки в программе Deform-3D. В обоих процессах использовалась труба диаметром  $d = 38$  мм с толщиной стенки  $S = 1$  мм. Коэффициент трения составлял  $0,1$ . Задавалась кривая течения нержавеющей стали AISI 304. Процесс моделирования в указанных случаях происходил в 2 этапа [5].

На первом этапе моделирования обкатки винтообразной трубы, ролик или ролики вдавливаются в трубу на глубину  $h = 2$  мм, в дальнейшем 3,5 мм и 4,3 мм. При этом формирование канавок глубиной 3,5 мм происходило после получения канавки глубиной 2 мм, а формирование канавки глубиной 4,3 мм – после получения канавки глубиной 3,5 мм. Далее производилось сравнение обкатки однозаходной с шагом 8 мм и трехзаходной с шагом 24 мм винтообразной трубы. Оправка в каждом случае моделирования вращалась в направлении, противоположном вращению роликов с частотой вращения  $n = 160$  об/мин. Этапы моделирования винтообразной трубы представлены в работе [5]. Анализ первого этапа моделирования показывает, что в данном случае в локальной ячейке деформации реализуется напряженно-деформированное состояние (НДС) с двумя напряжениями и деформациями растяжения, напряжением и деформацией сжатия. Интенсивное течения металла происходит возле скругленных выступов оправки, а также – возле скругленных краев ролика. В этих двух криволинейных зонах трубы напряженное состояние, как было сказано, близкое к двuosному растяжению. Напряжения, которые возникают в этих зонах, зависят от радиусов кривизны этих зон. Поэтому чем меньше радиус, тем больше значение главных напряжений.

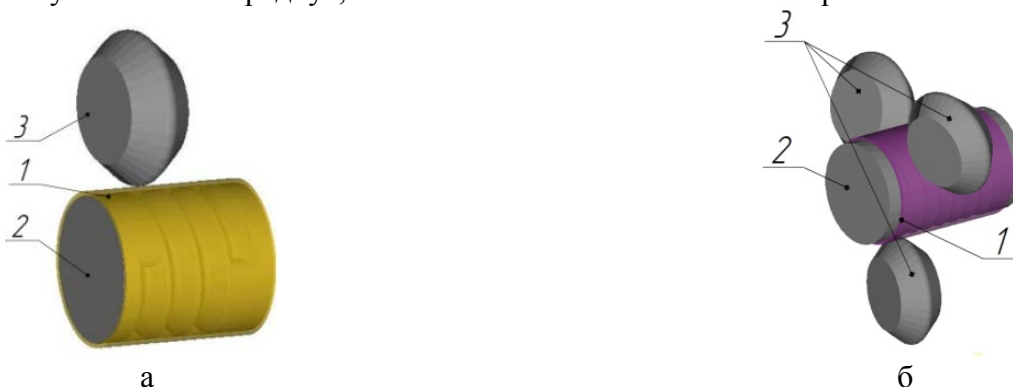


Рис. 7. Модель процессов, созданных в программе Deform-3D:

а – обкатка однозаходной винтообразной трубы ; б – обкатка трехзаходной винтообразной трубы (1 – труба-заготовка, 2 – оправка, 3 – ролик или ролики)

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

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

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 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 построены графики влияния указанных параметров на максимальную величину интенсивности напряжений  $\sigma_i$ , величину интенсивности деформации  $\varepsilon_i$  и величину критерия Броззо на внутренней поверхности трубы (зависимости на внешней поверхности подобные), они показаны на рис. 8–10. Разница в значениях интенсивностей напряжений, деформаций и величины критерия Броззо на внешней и на внутренней поверхностях трубы составляет 8...10% (их значение больше на внутренней поверхности).

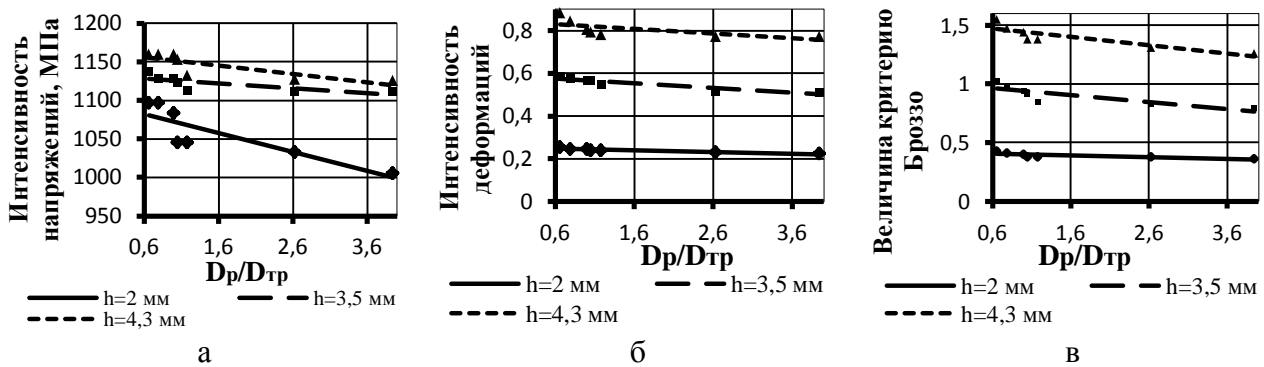


Рис. 8. Влияние отношения диаметра ролика  $D_p$  к диаметру трубы  $D_{тр}$  при формировании канавок различной глубины  $h$ :

а – интенсивность напряжений; б – интенсивность деформаций; в – величина критерия Броззо (максимальные значения на внутренней поверхности)

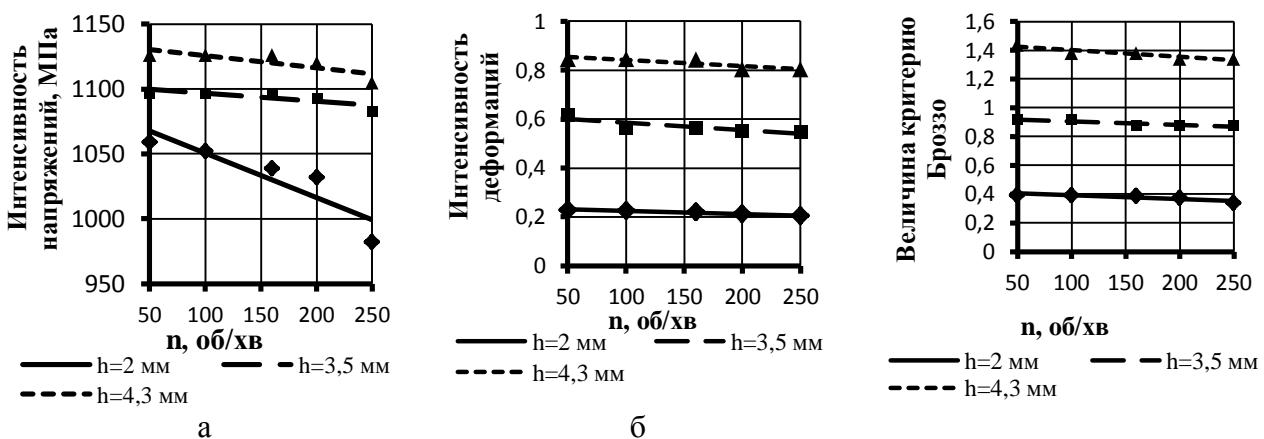


Рис. 9. Влияние частоты вращения трубы  $n$  при формировании канавок различной глубины  $h$ :

а – интенсивность напряжений; б – интенсивность деформаций; в – величина критерия Броззо (максимальные значения на внутренней поверхности трубы)

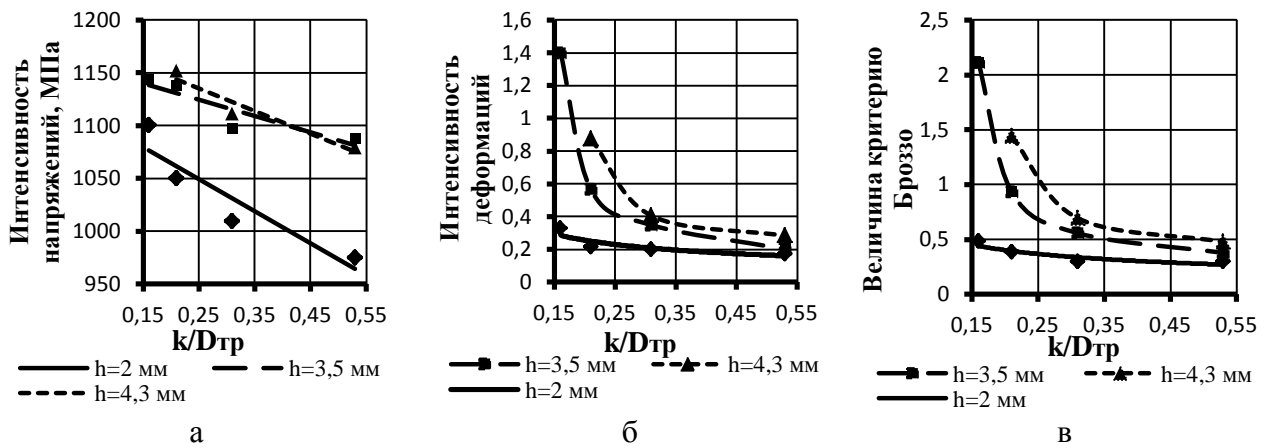


Рис. 10. Влияние соотношения шага винтовой оправки  $k$  к диаметру трубы  $D_{тр}$  при формировании канавок различной глубины  $h$ :

а – интенсивность напряжений; б – интенсивность деформаций; в – величина критерия Брэнно

Численным моделированием получено распределение изолиний интенсивности напряжений при обкатке острым роликом (рис. 11, а) кольцевой канавки на трубе из стали AISI 321, а также при многороликовой обкатке кольцевой канавки (глубиной 4 мм) роликами с разными радиусами скругления (рис. 11, б–11, г).

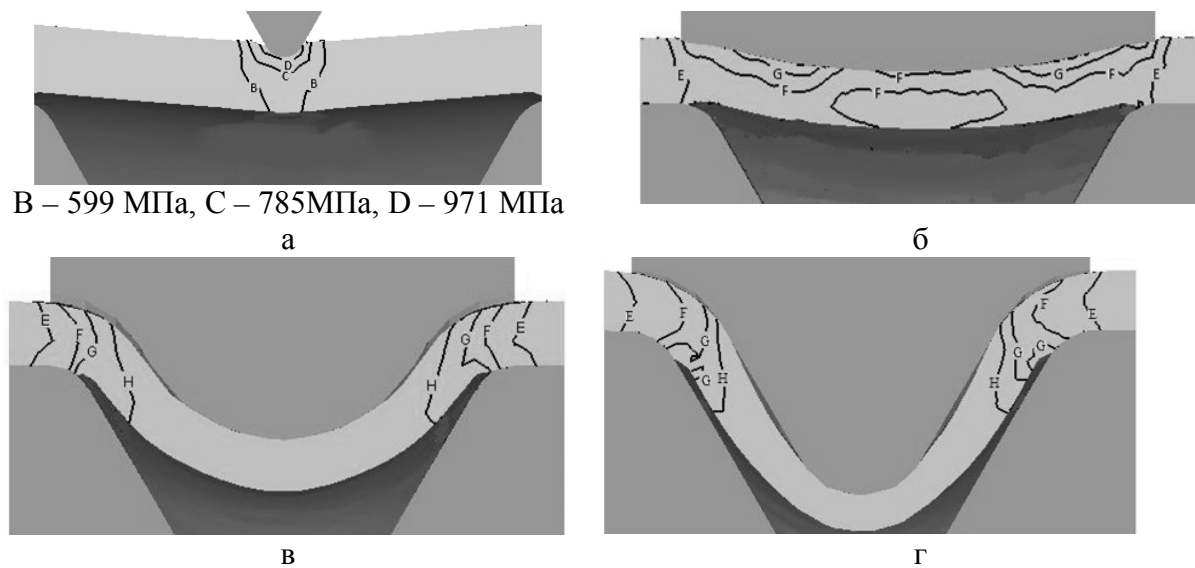


Рис. 11. Распределение интенсивности напряжений в разрезах трубы при обкатке острым роликом:

а – на различных этапах многороликовой обкатки: б – при глубине канавки 0,5 мм, в – при глубине 2,5 мм, г – при глубине 4 мм (Е – 663 МПа, F – 829 МПа, G – 995 МПа, H – 1160 МПа).

Установлено снижение интенсивностей напряжений и деформаций при многороликовой обкатке по сравнению с обкаткой острым роликом.

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

После получения на трубе винтовой канавки с шагом 8 мм было выполнено измерение микротвердости в сечении трубы, и по ней с помощью экспериментально-расчетного метода Деля определено распределение интенсивности напряжений (в скобках на рис. 12, а) [6]:

$$\sigma_i = K \cdot HV, \quad (2)$$

где  $K = 0,3$ ,  $HV$  – твердость по Викерсу.

Распределение интенсивности напряжений в сечении канавки винтообразной трубы с шагом 8 мм было также определено путем моделирования, которое показано на рис. 12, б.

Как видно из рис. 12, распределения интенсивности напряжений, определенные экспериментально, и при моделировании в программе DEFORM–3D подобны. Созданная модель в указанной программе достаточно точно (с погрешностью около 6...10%) воспроизводит процесс обкатки винтообразной трубы.

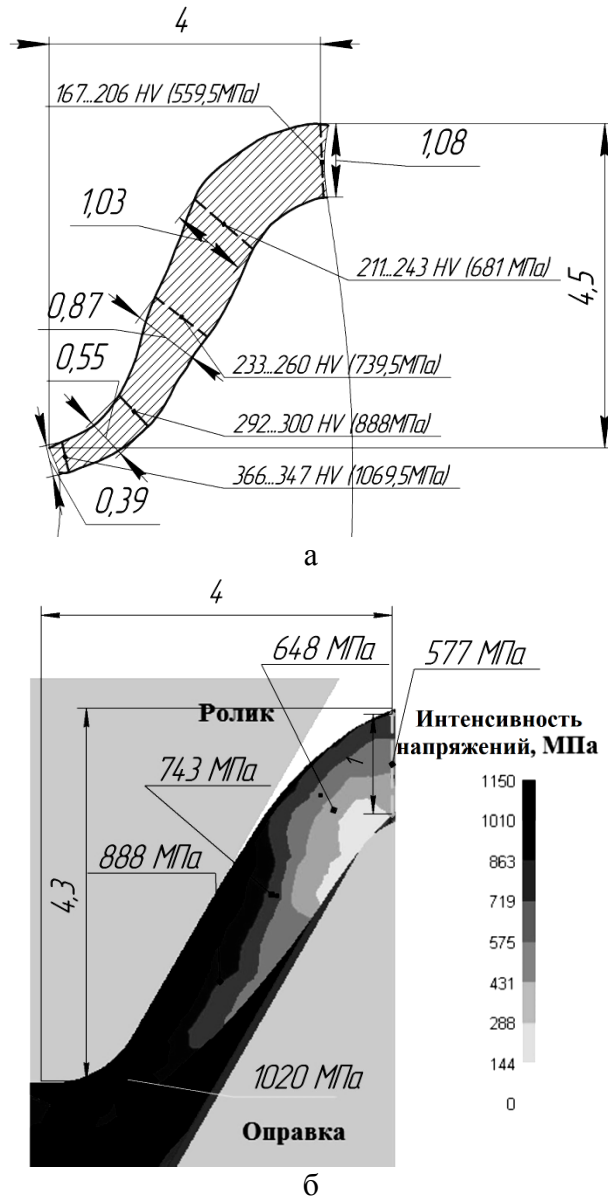


Рис. 12. Сравнение распределений интенсивностей напряжений в сечении канавки, определенных:

а – экспериментально (в скобках); б – моделированием в DEFORM–3D

На всех образцах их поверхность имеет большую деформацию, чем сердцевина. Области с большой деформацией состоят из мелких зерен, некоторые из них вытянуты в направлении течения металла. Сердцевина образца состоит из крупных не вытянутых зерен.

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что наибольшее влияние на НДС в процессе производства винтообразных труб оказывает шаг винтовой оправки  $k$ , и чем он больше (больше ширина канавки),

тем более глубокую канавку можно сформировать на трубе. Разница между НДС при формировании одно – и многозаходной винтообразной трубы с одинаковой шириной канавок незначительны. Частота вращения оправки  $n$  и коэффициент трения  $\mu$  незначительно влияют на процесс роликового обкатывания винтообразной трубы. Использование роликов больших диаметров ( $D_p \geq 100$ ) в процессе обкатки трубы позволяет уменьшить деформацию стенки трубы и снизить возможность возникновения винтовой трещины в процессе изготовления. Формирование винтовых канавок на трубе осуществляется за счет локального пластического деформирования и утонения ее стенки. Общее увеличение твердости на впадинах витков канавок достигает 50%.

2. Установлена возможность изготовления роликовой обкаткой без оправки качественных винтообразных профилей на трубках теплообменников из латуни диаметром 16x1 мм глубиной до 1,5 мм за 1 проход, при этом теплопередача увеличивается на 30...50%.

3. Разработаны технология и оснастка для профилирования труб путем трехроликовой обкатки и проверена ее работоспособность при изготовлении трехзаходных труб.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теплоаеродинамічна ефективність гвинтоподібних труб з рівнорозвиненою поверхнею / Л. В. Демчук, В. А. Рогачов, О. М. Терех, О. І. Руденко // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий* – 2011. – № 5/8 (53). – С. 26–29.
2. Патент 2152837 РФ, МКИ В 21 D 15/04. Способ изготовления труб с винтовыми гофрами и устройство для его осуществления. Заявл. 15.06.1999; Опубл. 20.07.2000, – 10 с.
3. Мар'їн С. Б. Изготовление элементов трубопроводов из трубчатых заготовок с применением эластичных и сыпучих сред / С. Б. Мар'їн // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 2009. – № 10. – С. 24–28.
4. Маковей В. О. Особливості профілювання одно та трьох західних 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. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. – М.: *Машиностроение*, 1971. – 193 с.

### REFERENCES

1. *Teploaerodinamichna efektivnist' gvintopodibnih trub z rivnorozvinoju poverhneju* / L. V. Demchuk, V. A. Rogachov, O. M. Tereh, O. I. Rudenko // *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij* – 2011. – № 5/8 (53). – S. 26–29.
2. *Patent 2152837 RF, MKI B 21 D 15/04. Sposob izgotovlenija trub s vintovymi goframi i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija*. *Zajavl.* 15.06.1999; *Opubl.* 20.07.2000, – 10 s.
3. *Mar'in S. B. Izgotovlenie jelementov truboprovodov iz trubchastyh zagotovok s primeneniem jelasticchnyh i sybuchih sred* / S. B. Mar'in // *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo*. – 2009. – № 10. – S. 24–28.
4. *Makovej V. O. Osoblivosti profiljuvannja odno ta tr'oh zahidnih gvintopodibnih trub* / V. O. Makovej, P. Ju. Procenko // *Vestnik Nacional'nogo tehničeskogo universiteta «HPI»*. – 2013. – S. 153–162.
5. *Makovej V. A. Issledovanie lokal'nogo deformirovanija truby pri profilirovanii vintovyh kanavok* / V. A. Makovej, P. Ju. Procenko // *Vestnik Nacional'nogo tehničeskogo universiteta «HPI»*. – 2011. – № 46. – S. 107–115.
6. *Del' G. D. Opredelenie naprjazhenij v plasticheskoj oblasti po raspredeleniju tverdosti*. – М.: *Mashinostroenie*, 1971. – 193 s.

Маковей В. А. – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПИ»;  
Проценко П. Ю. – ассистент НТУУ «КПИ»;  
Мельник В. С. – аспирант НТУУ «КПИ».

НТУУ «КПИ» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев.

E-mail: makovej@ukr.net, pavel07@i.ua