

**УДК 621.983.3.001 – 621.983.7.004**

**МАКОВЕЙ В. А.**, канд. техн. наук, доц., НТУУ “КПИ”, Киев

**ПРОЦЕНКО П. Ю.**, аспирант, НТУУ “КПИ”, Киев

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТРУБЫ ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ ВИНТОВЫХ КАНАВОК**

Проведено моделирование нескольких вариантов обкатки роликом канавки на трубе с использованием программного пакета Deform 3D. В качестве профилирующих инструментов для получения винтовых канавок на тонкостенной трубе применяются ролики и оправка. Исследовано влияние диаметра ролика на напряженно-деформированное состояние и локализацию деформации.

Проведено моделювання декількох варіантів обкатки роликом канавки на трубі з використанням програмного пакета Deform 3D. В якості профілюючих інструментів для отримання гвинтових канавок на тонкостінної труби використовуються ролики і оправка. Досліджено вплив діаметра ролика на напружено-деформований стан і локалізацію деформації.

The simulation of several variants of the roller profiling groove on the pipe using a software package Deform 3D. As a profiling tool for helical groove in a thin-walled tube are used rollers and the mandrel. The influence of the diameter of the roller on the stress-strain state and the localization of deformation was investigated.

Известным способом изготовления винтообразных труб является обкатка роликом с использованием оправки. Его осуществляют путем последовательной локальной пластической деформации стенки трубы при постоянном вращении трубчатой заготовки с закрепленной внутри нее винтовой оправкой и взаимосвязанном поступательном перемещении формообразующих элементов в виде тел качения вдоль оси обрабатываемой детали.

Процесс обкатки роликом сводится до пластического изменения формы путем перемещения частиц металла. Холодная пластическая деформация, которая происходит при обкатке, в значительной мере оказывает влияние на изменение физико-механических свойств. Показатели сопротивления деформации увеличиваются. При обкатке роликом следует стремиться к минимальной неоднородности деформации, поскольку градиент деформации повышает среднее напряжение и снижает пластичность, что может привести к разрушению и созданию в изделии остаточных напряжений [1]. При обкатке роликом деформируемые металлы упрочняются, причем неравномерное упрочнение сопровождается повышением твердости деформированного металла. В работе [2] показана возможность определения методом твердости интенсивностей напряжений при профилировании канавки.

**Цель работы:** определить напряженно-деформированное состояние, возникающее в процессе профилирования винтообразной канавки на трубе, и оценить локализацию деформации при профилировании.

В качестве профилирующих инструментов для получения винтовых канавок на тонкостенной трубе применяются ролики и оправка. Технологические схемы изготовления винтообразных труб подробно рассматриваются в работе [3]. Для определения НДС проводилось моделирование трех процессов профилирования винтообразной канавки на трубе роликовой обкаткой с использованием программного пакета Deform 3D, который был временно предоставлен для опробования компанией «Тесис» г.Москва. Процесс моделирования профилирования кольцеобразной канавки на трубе подробно описан в работе [4], в которой указаны особенности создания модели этого процесса. Ее можно использовать для моделирования процесса профилирования винтоподобной канавки на трубе. Для моделирования нескольких процессов профилирования винтообразной канавки использовались ролики и оправка с выточенной винтообразною канавкою (рис.1). Коэффициент трения при этом принят равным 0,1. В качестве материала трубы была выбрана сталь – X18H10T ( $\sigma_{0,2} = 530$  МПа  $\sigma_B = 740$  МПа). При этом моделирование процессов проводилось с разными диаметрами профилирующих роликов ( $d_{ролл1} = 12$  мм,  $d_{ролл2} = 38$  мм), а также с разными глубинами полученных канавок на трубе ( $h_{к1} = 2$  мм,  $h_{к2} = 3,5$  мм).

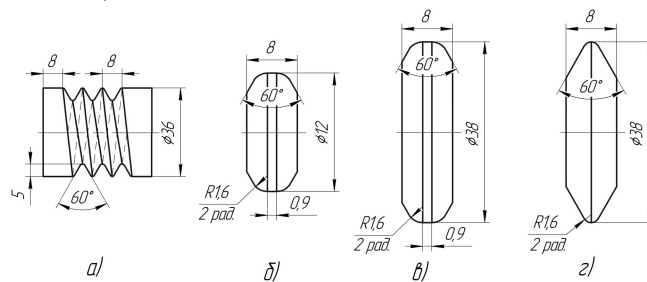


Рис. 1. Чертеж оправки – а и роликов – б, в, г

Каждый из этих процессов профилирования трубы можно разделить на два этапа (рис. 2):

1. Вдавливание ролика.
2. Обкатка роликом канавки на трубе.

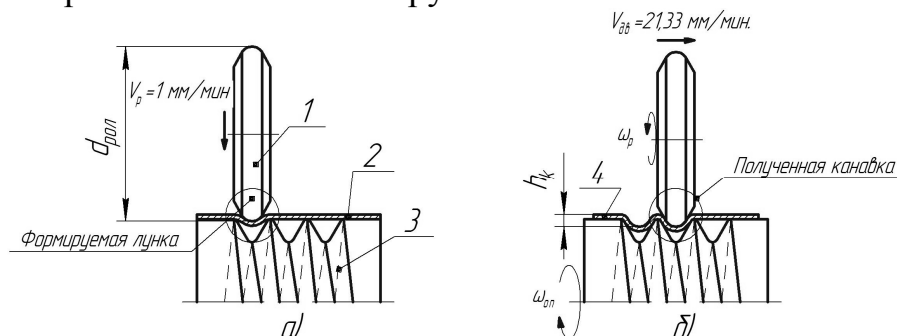


Рис. 2. Этапы процесса профилирования винтообразной трубы: а – ролик вдавливается в трубу, б – ролик формирует винтовую канавку на трубе

**Вдавливание ролика.** В каждом моделировании ролик 1 со скоростью  $V_{вд} = 1$  мм/с вдавливался в трубу 2, которая надета на оправку 3, на глубину  $h_k$  (см. рис. 2). В моделировании профилирования канавки на трубе глубиной  $h_k = 3,5$  мм

ролик  $d_{\text{рол}} = 38 \text{ мм}$  (см. рис. 1, г) вдавливался в уже сформированную канавку глубиной  $h_k = 2 \text{ мм}$ . Интенсивность напряжений на последнем шаге вдавливания, которая была определена в процессе моделирования с использованием ролика  $d_{\text{рол}} = 38 \text{ мм}$  (см. рис. 1, в), который вдавливался на глубину  $h_k = 2 \text{ мм}$ , показана на рис. 3. Установлено, что интенсивное течение металла происходит: на внешней поверхности лунки возле скругленных кромок матрицы, на внутренней поверхности – возле скругленных кромок ролика. Для дальнейшего анализа этого этапа на продольном разрезе сформированной лунки при вдавливании ролика  $d_{\text{рол}} = 38 \text{ мм}$  на глубину  $h_k = 2 \text{ мм}$  были выбраны точки в местах интенсивного течения металла, которые показаны на рис. 4. Для указанных точек построены графики зависимости интенсивностей напряжений  $\sigma_i$  от перемещения ролика, показанные на рис.5.

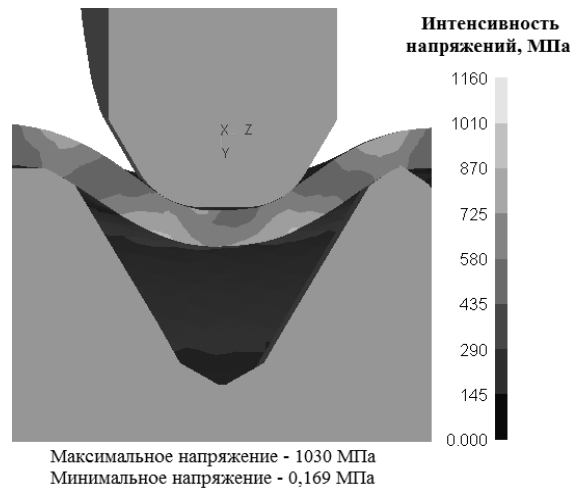


Рис. 3. Интенсивность напряжений на последнем шаге вдавливания ролика в трубу

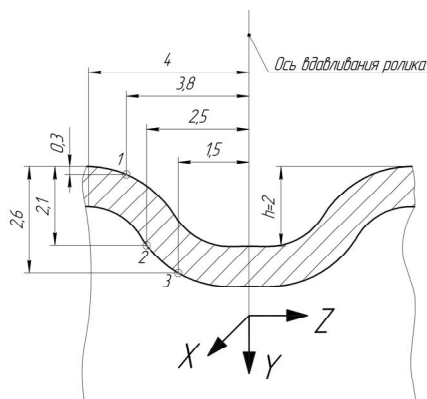


Рис. 4. Координаты точек в местах наибольшего течения металла

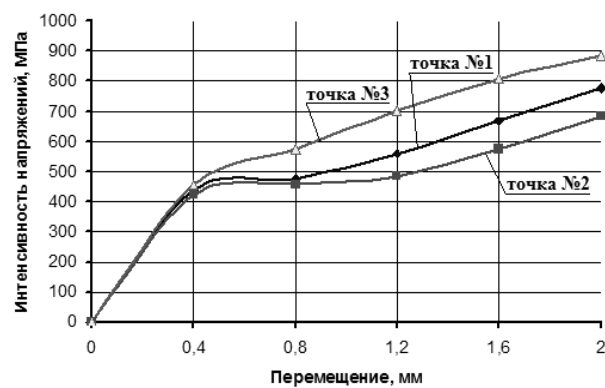


Рис. 5. Интенсивность напряжений в различных точках с наиболее интенсивным течением материала

В этих точках также были определены главные нормальные напряжения. Графики зависимости главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  от перемещения ролика в точках показаны на рис. 6 – 8. На рис. 9 показаны зависимости интенсивности деформаций в рассматриваемых точках.

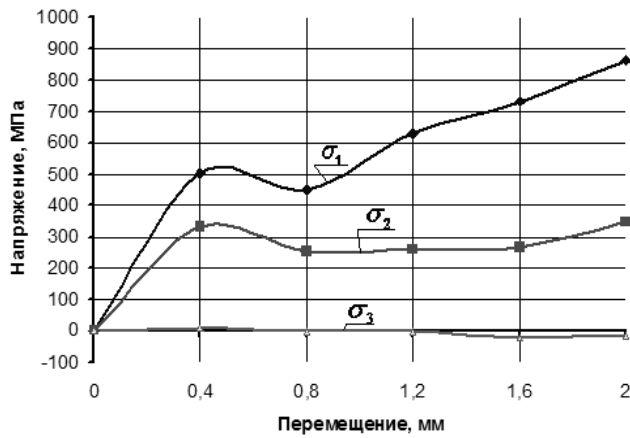


Рис. 6. Зависимости главных напряжений от перемещения ролика в точке №1

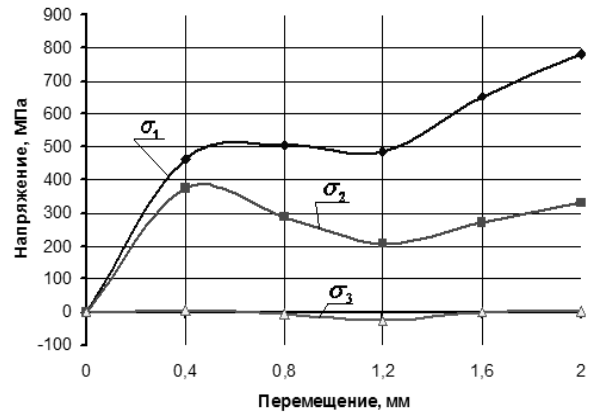


Рис.7. Зависимости главных напряжений от перемещения ролика в точке №2

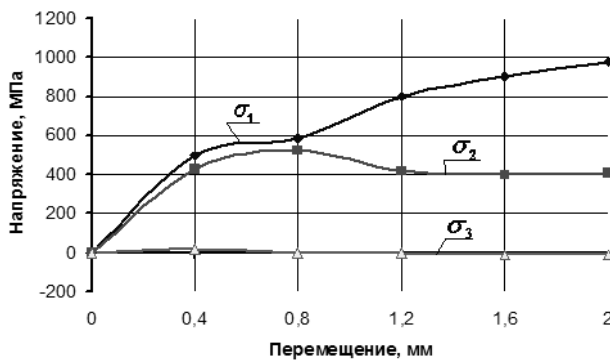


Рис. 8. Зависимости главных напряжений от перемещения ролика в точке №3

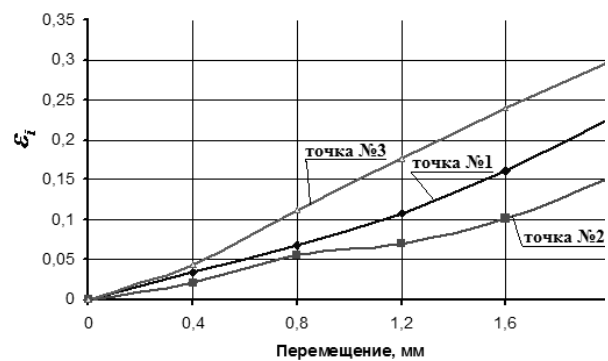


Рис. 9. Интенсивность деформаций в различных точках с наиболее интенсивным течением материала

Из графиков видно (см. рис. 6–8), что в данных точках напряженное состояние близко к двухосному растяжению, так как  $\sigma_3$  принимает небольшие значения.

В данном случае можно тоже выделить две зоны интенсивного течения металла. Первая зона находится возле скругленной кромки матрицы, вторая – возле скругленной кромки ролика, где происходит интенсивное течение материала. В этих двух криволинейных зонах напряженное состояние близко к двухосному растяжению. Напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  зависят от радиусов кривизны этих зон. Поэтому чем меньше эти радиуса кривизны, тем большие значения главных напряжений.

Предельная деформация в холодных процессах деформирования зависит от показателей напряженного состояния, которые характеризуют «жесткость» схемы напряженного состояния. Наиболее употребляемый в настоящее время показатель  $\eta$  характеризуется отношением октаэдрических главных и касательных напряжений [5]:

$$\eta = \frac{\sigma_{окт}}{\tau_{окт}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{2}\sigma_i} \quad (1)$$

Оценим жесткость схемы напряженного состояния в различных точках стенки трубы в зависимости от перемещения при вдавливании ролика  $d_{\text{рол}} = 38 \text{ мм}$  на глубину  $h_k = 2 \text{ мм}$  (рис. 10).

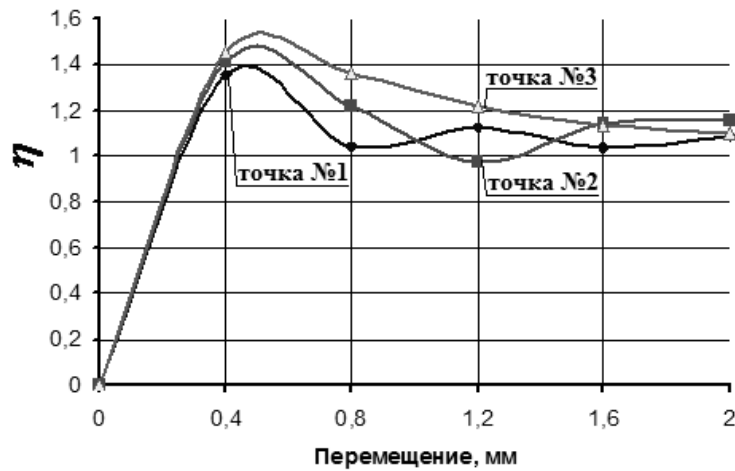


Рис. 10. Зависимости жесткости системы  $\eta$  от перемещения ролика в различных точках

**Обкатка роликом канавки.** После вдавливания ролика было проведено моделирование процесса обкатки трубы роликом (см. рис. 2). На данном этапе ролик 1 одновременно вращается вокруг своей оси с угловой скоростью  $\omega_p$ , а также в каждом случае моделирования движется вдоль нее со скоростью  $V_{\text{об}} = 21,33 \text{ мм/с}$ . При этом оправка в трех случаях моделирования вращается в противоположном направлении вращению ролика с угловой скоростью  $\omega_{\text{оп}} = 160 \text{ об/мин}$ .

Расчетная интенсивность напряжений в разрезе полученной винтоподобной канавки при использовании ролика  $d_{\text{рол}} = 38 \text{ мм}$  (см. рис. 2) с формированием канавки глубиной  $h_k = 2 \text{ мм}$ , приведенная на рис. 11. Откуда видно, что наиболее интенсивно материал течет возле скругленных кромок ролика. Поэтому в этих местах выполняются разрезы, как показано на рис. 12.

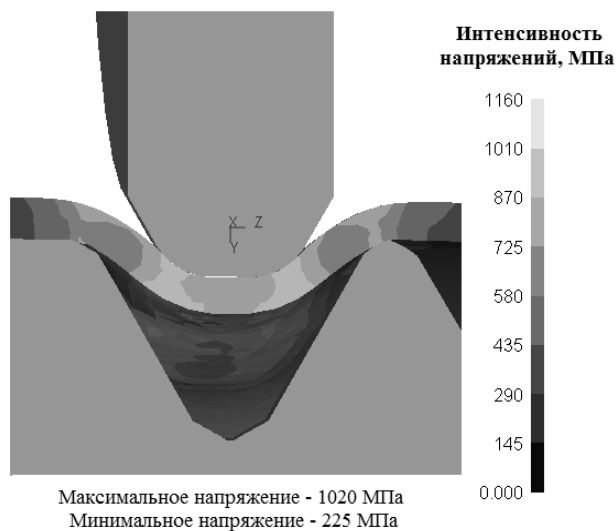


Рис. 11. Интенсивность напряжений при обкатке роликом трубы в осевом разрезе

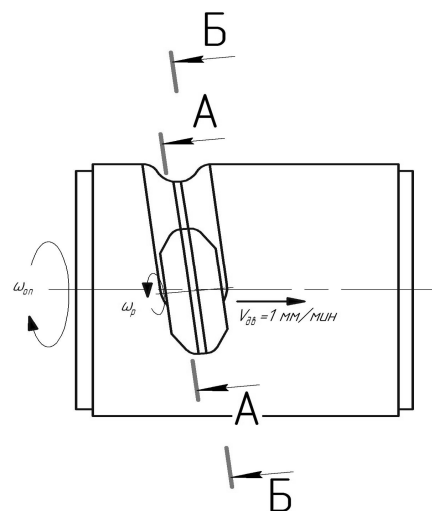


Рис. 12. Положение разрезов А-А и Б-Б

Далее рассматриваем два разреза А-А и Б-Б. В каждом из них с помощью программы DEFORM 3D находим распределение интенсивности напряжений, которое показано: для разреза А-А – рис. 13, для Б-Б – рис. 14. Из этих рисунков видно, что течение металла в разрезах А-А и Б-Б идентичное. Поэтому разрез Б-Б далее рассматривать не будем.

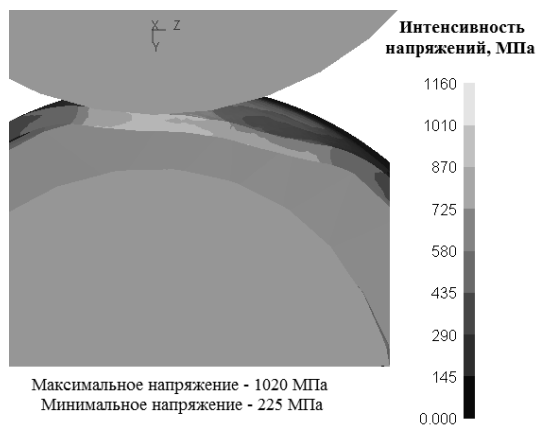


Рис.13. Распределение интенсивности напряжений в разрезе А-А

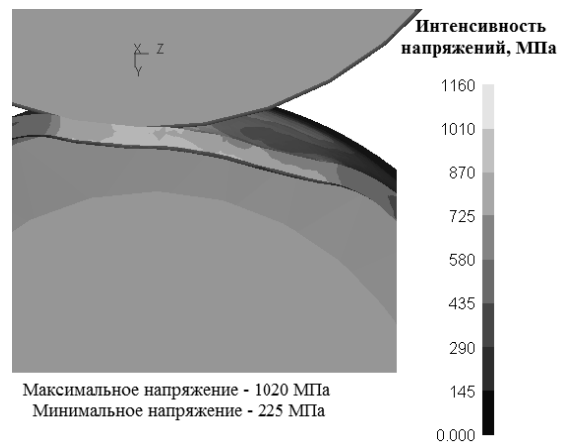


Рис.14. Распределение интенсивности напряжений в разрезе Б-Б

В разрезе А-А выбираем точки, показанные на рис. 15, для дальнейшего анализа процесса обкатки винтоподобной канавки на трубе. В зависимости от положения по оси  $z$  точек, указанные в табл. 1, были определены: интенсивность напряжений  $\sigma_i$  (рис. 16), интенсивность деформаций  $\varepsilon_i$  (рис. 17), жесткости напряженного состояния  $\eta$  (рис. 19) для всех трех случаев моделирования профилирования канавки на трубе и распределение главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  (рис. 18) для случая профилирования винтовой канавки на трубе глубиной  $h_k = 3,5 \text{ мм}$ .

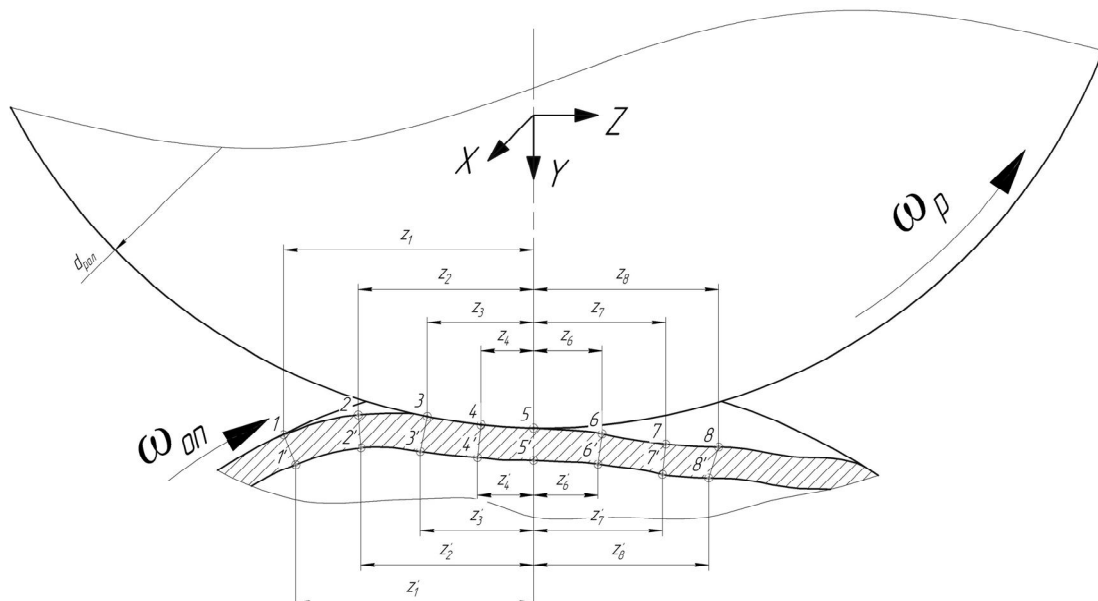
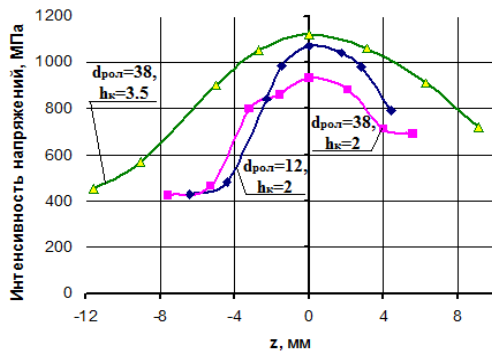


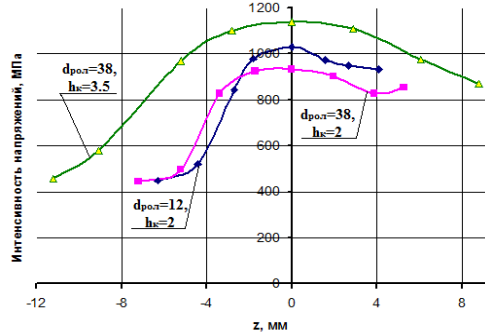
Рис. 15. Координаты точек по оси  $z$ , использованные для анализа процесса обкатки винтоподобной канавки на трубе

Таблица 1- Координаты точек по оси z при моделировании обкатки

$d_{\text{рол}} = 38 \text{ мм}, h_{\text{к}} = 2 \text{ мм}$		$d_{\text{рол}} = 38 \text{ мм}, h_{\text{к}} = 3,5 \text{ мм}$		$d_{\text{рол}} = 12 \text{ мм}, h_{\text{к}} = 2 \text{ мм}$				
$\omega_{\text{р}} = 143 \text{ об/мин},$		$\omega_{\text{р}} = 130 \text{ об/мин},$		$\omega_{\text{р}} = 453 \text{ об/мин},$				
$\omega_{\text{опр}} = 160 \text{ об/мин}$		$\omega_{\text{опр}} = 160 \text{ об/мин}$		$\omega_{\text{опр}} = 160 \text{ об/мин}$				
№ точки	z	№ точки	z	№ точки	z			
Точки на внешней поверхности	1	-7,6	Точки на внешней поверхности	1	-11,6	Точки на внешней поверхности	1	-6,4
	2	-5,3		2	-9,06		2	-4,4
	3	-3,2		3	-5,02		3	-2,3
	4	-1,6		4	-2,7		4	-1,5
	5	0		5	0		5	0
	6	2,07		6	3,1		6	1,7
	7	4		7	6,3		7	2,8
	8	5,6		8	9,1		8	4,4
Точки на внутренней поверхности	1'	-7,2	Точки на внутренней поверхности	1'	-11,2	Точки на внутренней поверхности	1'	-6,3
	2'	-5,2		2'	-9,07		2'	-4,4
	3'	-3,4		3'	-5,2		3'	-2,7
	4'	-1,7		4'	-2,8		4'	-1,8
	5'	0		5'	0		5'	0
	6'	1,95		6'	2,9		6'	1,6
	7'	3,9		7'	6,1		7'	2,7
	8'	5,3		8'	8,8		8'	4,1

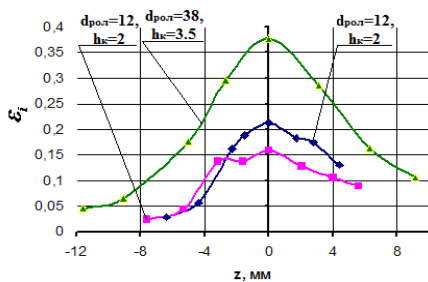


а)

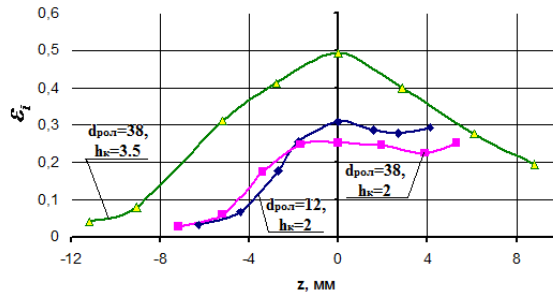


б)

Рис. 16. Зависимости интенсивности напряжений в разных точках: а – на внешней поверхности трубы, б – на внутренней поверхности трубы



а)



б)

Рис. 17. Зависимости интенсивности деформаций: а – на внешней поверхности трубы, б – на внутренней поверхности трубы

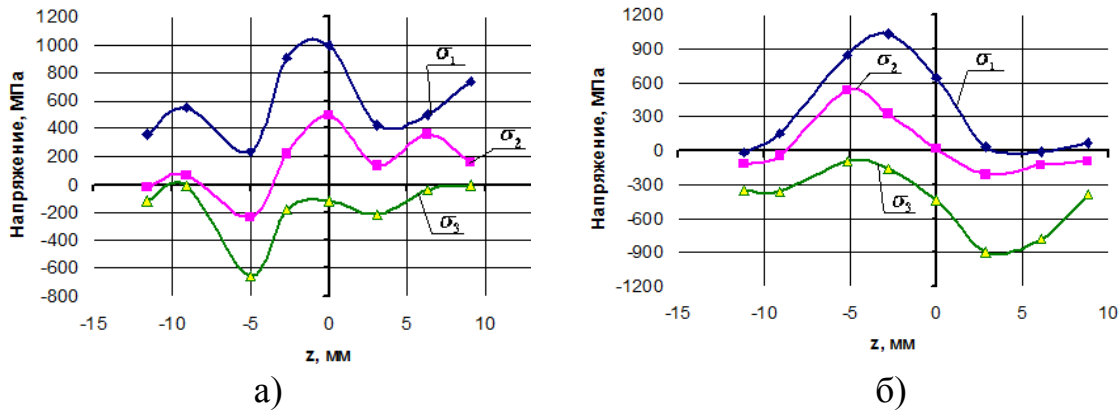


Рис. 18. Зависимости главных напряжений: а – на внешней поверхности трубы, б – на внутренней поверхности трубы

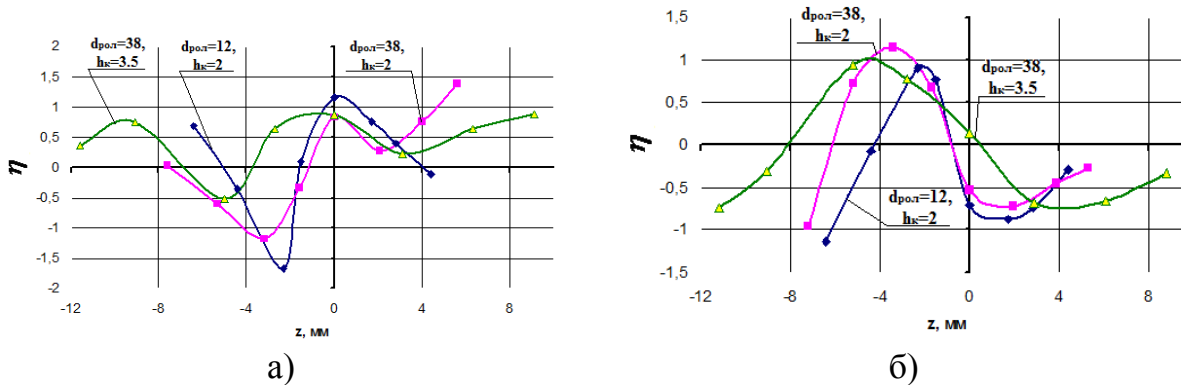


Рис. 19. Зависимости жесткости напряженного состояния: а – на внешней поверхности трубы, б – на внутренней поверхности трубы

По результатам изготовления винтоподобных труб было получено распределение твердости по толщине стенки. Используя экспериментальный метод определения напряжений по распределению твердости [2], можно найти распределение интенсивности напряжений в обрабатываемом теле. При этом интенсивность напряжений связана с твердостью по Викерсу зависимостью:

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

де  $K = 0,3$ ,  $HV$  – твердость по Викерсу

Твердость и интенсивность напряжений, которые определены экспериментальным путем, показаны на рис. 20. При больших глубинах профилирования в области наибольшей глубины канавки ( $h_c \geq 4,5\text{мм}$ ) появляется разрушение. На рис. 21 показана разрушенная труба винтовой трещиной.

Сравнение полученных экспериментальных и расчетных деформаций вдоль оси ролика  $d_{\text{ролл}} = 38\text{ мм}$  (см. рис. 15) приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение экспериментальных и расчетных деформаций вдоль оси ролика  $d_{\text{ролл}} = 38\text{ мм}$

Моделирование			Эксперимент	
$h_k, \text{мм}$	$\varepsilon_y, \text{мм}$	$\varepsilon_i, \text{мм}$	$h_k, \text{мм}$	$\varepsilon_y, \text{мм}$
2	0,205	0,213	1,96	0,227
3,5	0,366	0,459	3,73	0,5
$h_k$ - глубина канавки				

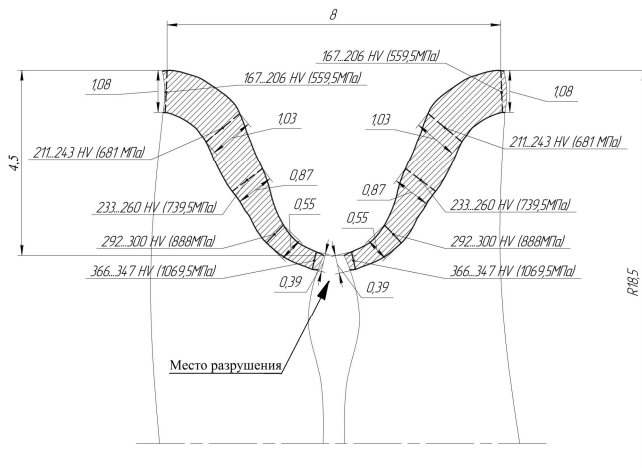


Рис. 20. Распределение твердости и интенсивности напряжений (указанные в скобках), полученных экспериментально



Рис. 21. Фотография трубы с винтовой трещиной

### Выводы:

1. При вдавливании ролика интенсивное течение металла происходит: на внешней поверхности формируемой лунки возле скругленных кромок матрицы, а на внутренней – возле скругленных кромок ролика. Напряженное состояние в этих зонах имеет вид близкий до двухосного растяжения, так как  $\sigma_3$  принимает небольшие значения.

2. При обкатке роликом трубы наибольшие интенсивности напряжений и деформаций достигаются возле скругленных кромок ролика. При этом жесткость напряженного состояния на внешней поверхности трубы достигает максимума на оси ролика, а на внутренней – в точке начала деформирования трубы (т. 3' см. рис. 15). Винтовое разрушение трубы появляется в области наибольшей глубины канавки ( $h_c \geq 4,5$  мм) при деформации  $\varepsilon_k \geq 0,6$  (рис.21).

**Список литературы:** 1. Огородников В.А., Музичук В.І., Нахайчук О.В. Механіка процесів формозмінювання з однотипними схемами механізму деформації. – Вінниця, Універсум, 2007. – 179 с. 2. Маковей В.О. Напряженно-деформированное состояние винтоподобных труб при профилировании / Маковей В.О., Бородій Ю.П., Проценко П.Ю. // Вестник НТУ "ХПИ". – 2010. – №42 – С. 64-70. 3. Маковей В. О. Профілювання гвинтоподібних труб обкочуванням / Маковей В.О., Бородій Ю.П., Кліско А.В., Проценко П.Ю. // Вісник Київського політехн. ін-та. Машинобудування. – 2010. – №60. – С. 55-60. 4. Маковей В.О. Моделювання процесу профілювання канавок на трубах роликовим обкочуванням / Маковей В.О., Проценко П.Ю. // Вісник Київського політехн. ін-та. Машинобудування. – 2011. – №62. – С. 203-206. 5. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов. Изд. "Машиностроение", 1977. 272 стр.