

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 тонкостінній трубі 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).

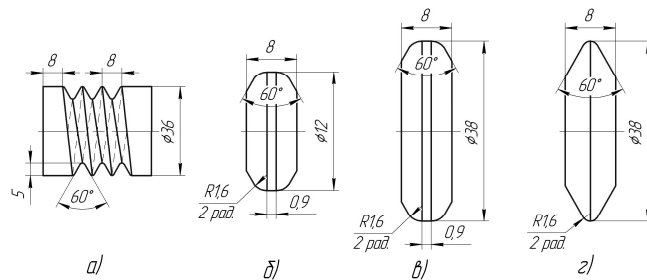


Рис. 1. Чертеж оправки – а и роликов – б, в, г

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

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

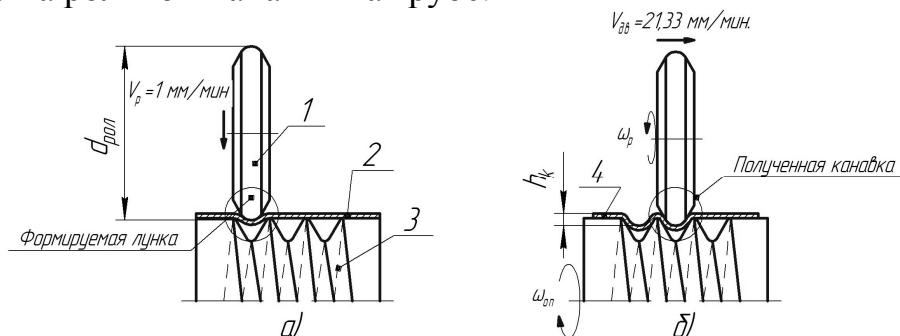


Рис. 2. Этапы процесса профилирования винтообразной трубы: а – ролик вдавливается в трубу, б – ролик формирует винтовую канавку на трубе

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 σ_i от перемещения ролика, показанные на рис.5.

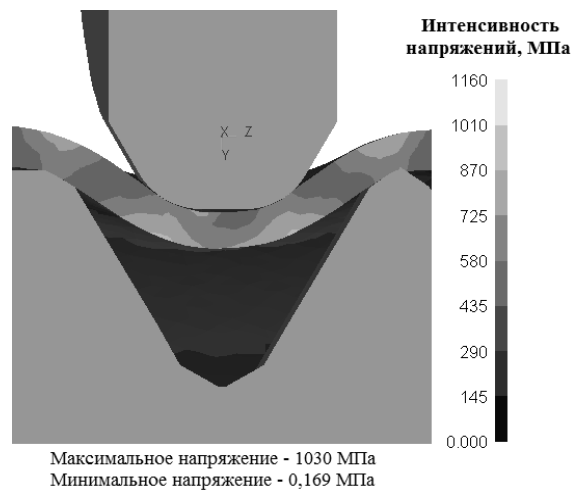


Рис. 3. Интенсивность напряжений на последнем шаге вдавливания ролика в трубу

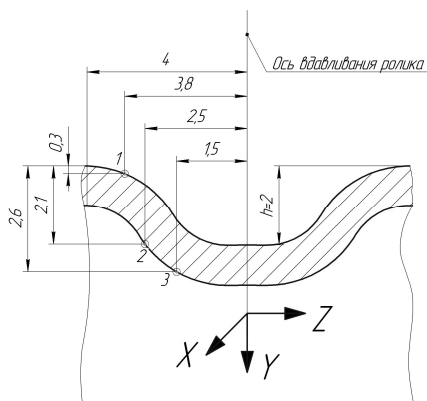


Рис. 4. Координаты точек в местах наибольшего течения металла

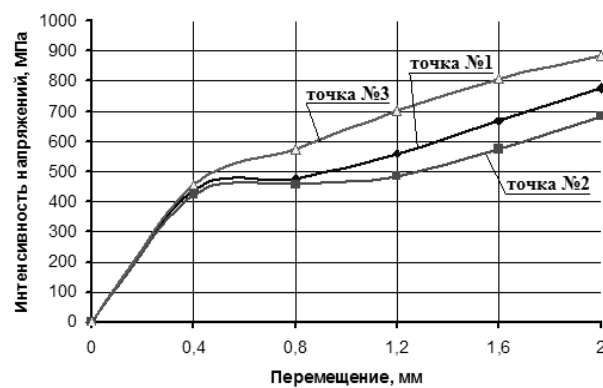


Рис. 5. Интенсивность напряжений в различных точках с наиболее интенсивным течением материала

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.

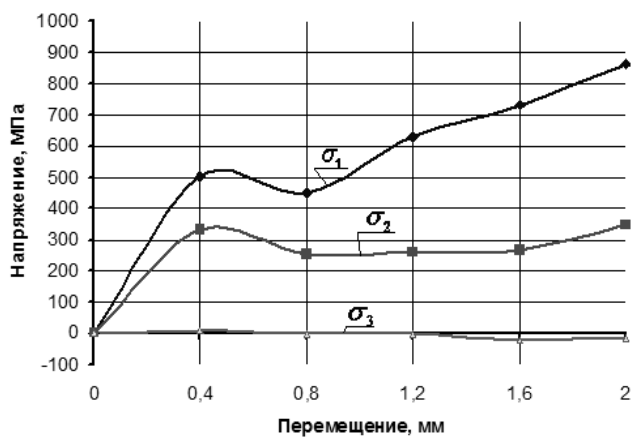


Рис. 6. Зависимости главных напряжений от перемещения ролика в точке №1

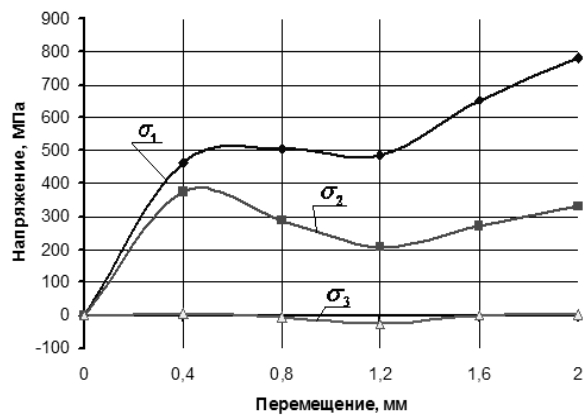


Рис.7. Зависимости главных напряжений от перемещения ролика в точке №2

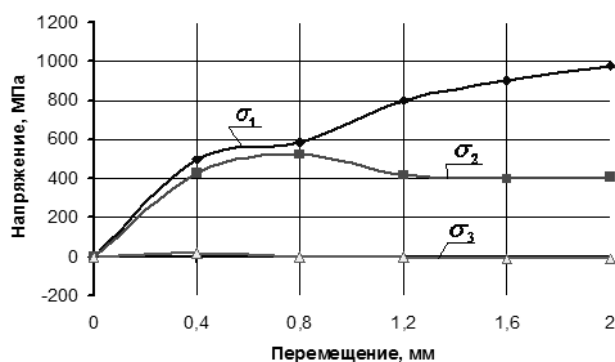


Рис. 8. Зависимости главных напряжений от перемещения ролика в точке №3

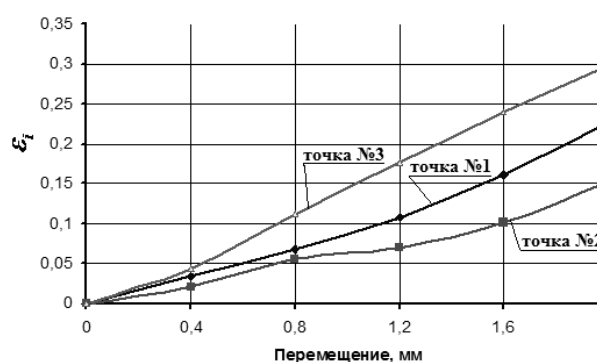


Рис. 9. Интенсивность деформаций в различных точках с наиболее интенсивным течением материала

Из графиков видно (см. рис. 6–8), что в данных точках напряженное состояние близко к двухосному растяжению, так как σ_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 σ_1 и σ_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 η 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).

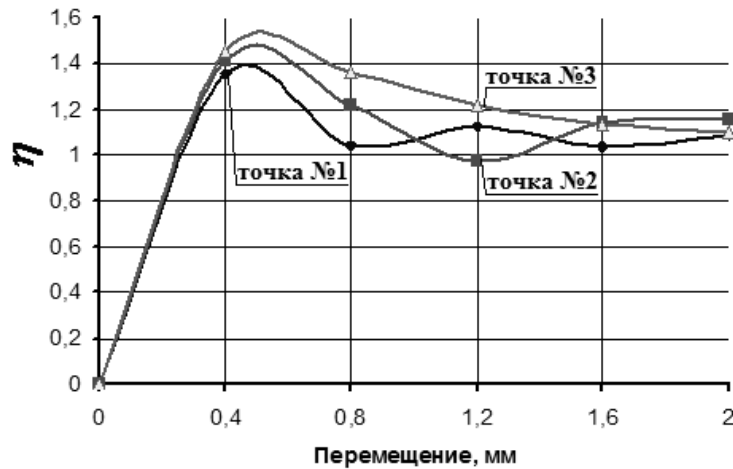


Рис. 10. Зависимости жесткости системы η от перемещения ролика в различных точках

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 ω_p , а также в каждом случае моделирования движется вдоль нее со скоростью $V_{\text{ов}} = 21,33 \text{ мм/с}$. 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.

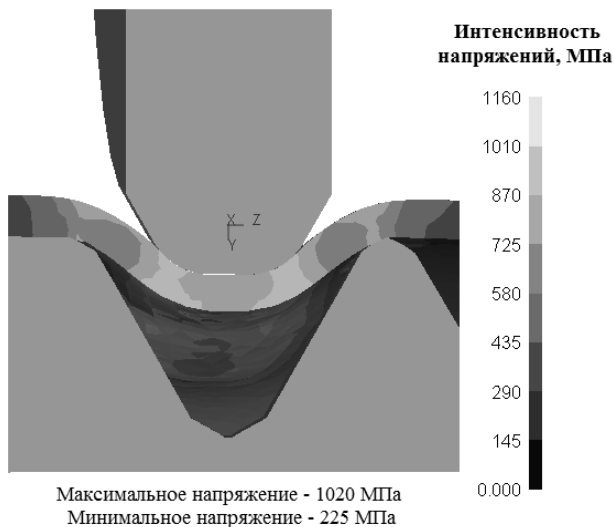


Рис. 11. Интенсивность напряжений при обкатке роликом трубы в осевом разрезе

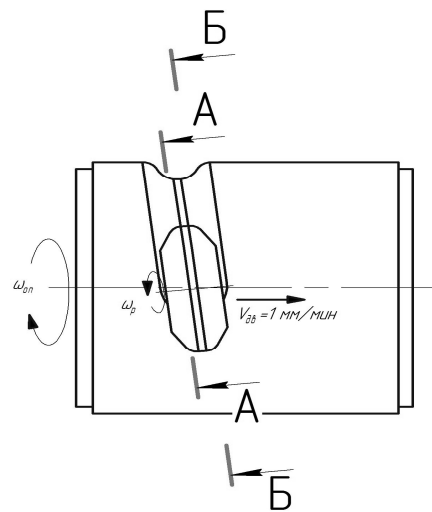


Рис. 12. Положение разрезов А-А и Б-Б

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.

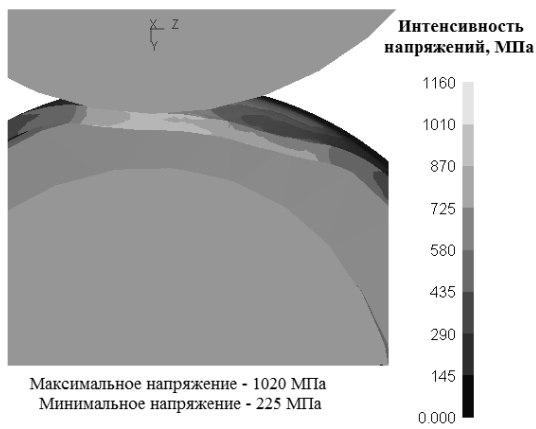


Рис.13. Распределение интенсивности напряжений в разрезе А-А

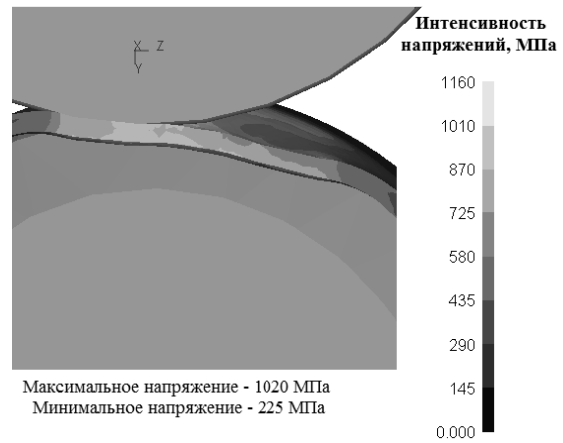


Рис.14. Распределение интенсивности напряжений в разрезе Б-Б

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 σ_i (рис. 16), интенсивность деформаций ε_i (рис. 17), жесткости напряженного состояния η (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 $h_k = 3,5 \text{ мм}$.

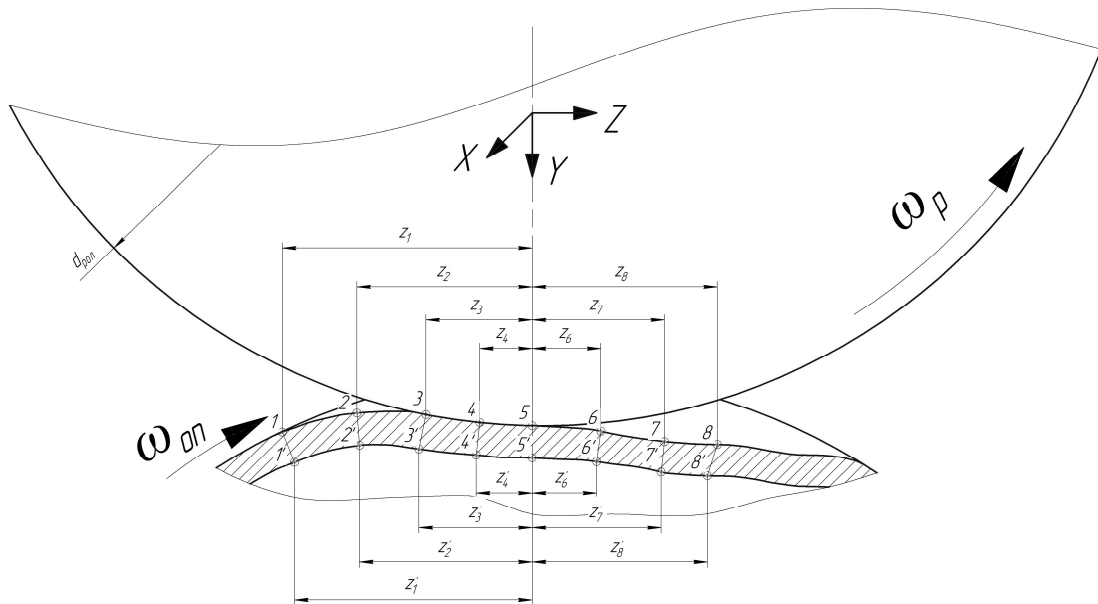
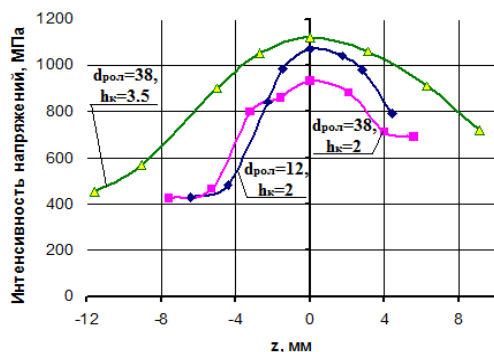


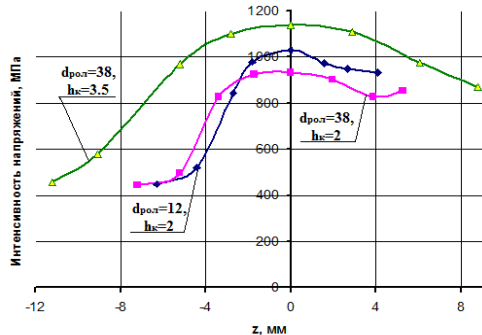
Рис. 15. Координаты точек по оси z , использованные для анализа процесса обкатки винтоподобной канавки на трубе

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

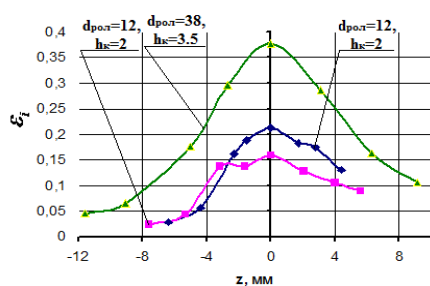


а)

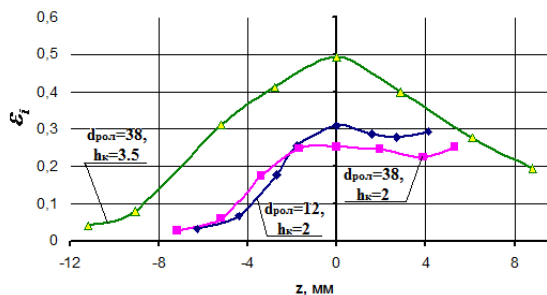


б)

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

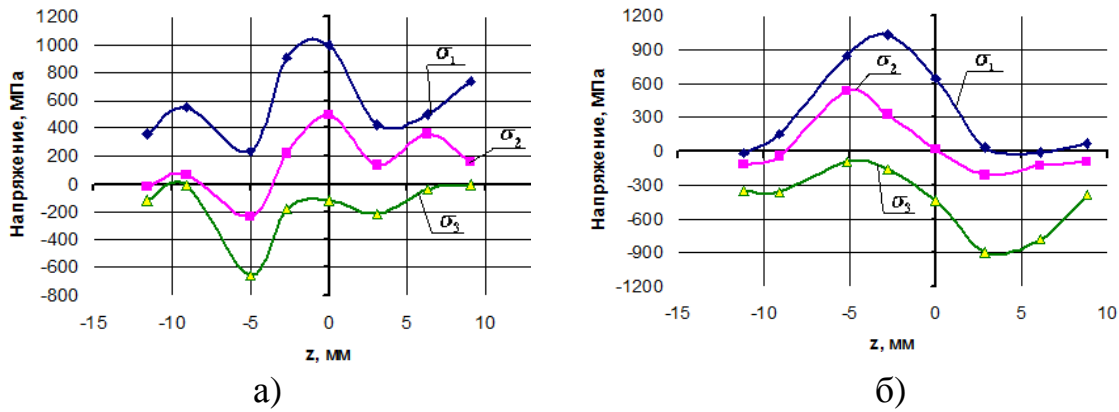


Рис. 18. Зависимости главных напряжений: а – на внешней поверхности трубы, б – на внутренней поверхности трубы

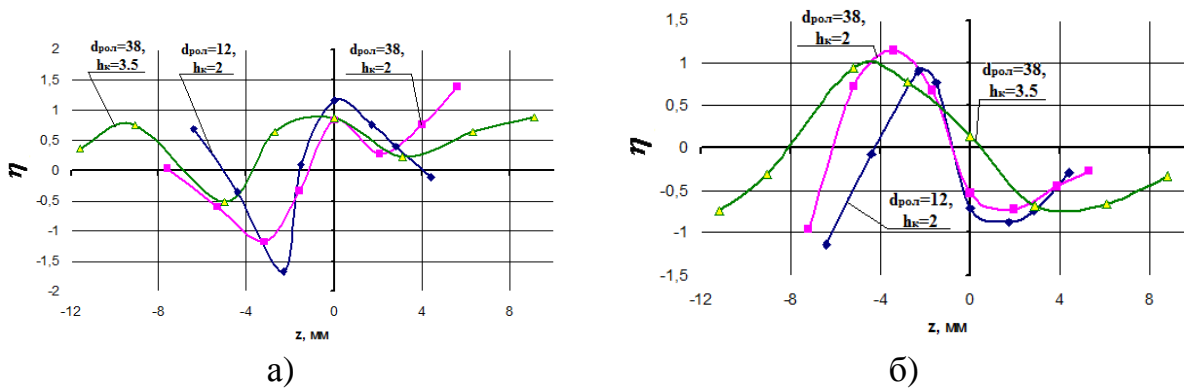


Рис. 19. Зависимости жесткости напряженного состояния: а – на внешней поверхности трубы, б – на внутренней поверхности трубы

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				

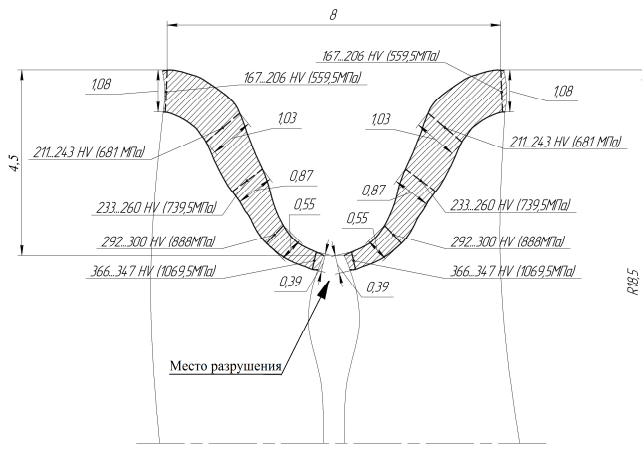


Рис. 20. Распределение твердости и интенсивности напряжений (указанные в скобках), полученных экспериментально



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 σ_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 $\epsilon_k \geq 0,6$ (рис.21).

Список литературы: 1. Огородніков В.А., Музичук В.І., Нахайчук О.В. Механіка процесів формозмінювання з одностипними 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.