

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №10 (172). С.31-39.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №10 (172). P.31-39.

Научная статья

УДК 539.411.001.24; 621.787.4

doi: 10.30987/2223-4608-2025-10-31-39

Технология отделочно-упрочняющего ротационного обкатывания роликами длинных тонкостенных труб

Юрий Иванович Сидякин¹, д.т.н.

Юлий Львович Чигиринский², д.т.н.

Александр Михайлович Лаврентьев³, инженер

Светлана Юрьевна Абакумова⁴, инженер

Сергей Николаевич Ольштынский⁵, к.т.н.

^{1, 2, 4, 5} Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

³ Камышинский технологический институт, филиал ВолгГТУ, Камышин, Россия

¹ y_sidyakin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6418-4170>

² julio-tchigirinsky@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5620-5337>

³ lamvstu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁴ svetlanaforsc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁵ for_lead22@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6030-5725>

Аннотация. Предложено аналитическое решение упругопластической контактной задачи применительно к процессам отделочно-упрочняющей механической обработки длинных тонкостенных труб ротационным обкатыванием цилиндрическими и псевдосферическими тороидальными роликами. Рассматривается технологическое и инструментальное обеспечение этих процессов с целью повышения качественных показателей поверхностей труб и устранения погрешностей геометрической формы поперечного сечения. Определены условия самоподачи труб во время обработки. Разработан алгоритм расчета рациональных режимов поверхностного пластического деформирования длинномерных тонкостенных труб в программном комплексе Mathcad, учитывающий особую геометрию и повышенную гибкость тонкостенных труб, а также жесткие требования к изделиям по точности диаметрального размера и качеству обработанных поверхностей. Предлагаемая методика расчётного назначения рациональных технологических режимов отделочно-упрочняющей обработки прошла экспериментальную проверку на тонкостенных трубах (местами сплюснутых до 1 мм по диаметру) из стали 30 твёрдостью HB160 с исходной шероховатостью поверхности $Ra = 1,25 \dots 1,6$ мкм. Обкатка труб проводилась с применением 3-х роликового обкатного устройства при частоте вращения обоймы с цилиндрическими роликами около 80 об/мин. Расчётные углы наклона роликов в обойме обкатного устройства и технологические параметры режима обработки позволили при 5...8-ми кратном перекрытии первоначального следа инструмента обеспечить не только условия самоподачи трубы и высокую производительность процесса, но и получение требуемых глубин наклёпа и степени деформационного упрочнения её поверхности. При этом шероховатость поверхности снизилась почти на порядок (до $Ra \leq 0,2$ мкм) без заметных следов волнистости и шелушения, а первоначальная некруглость сечения трубы практически совсем исчезла. Разработанная методика ротационной обкатки длинных тонкостенных труб рекомендуется к широкому практическому использованию на машиностроительных предприятиях.

Ключевые слова: тонкостенная труба, упругопластическая контактная деформация, ротационная обкатка, тороидальный ролик

Для цитирования: Сидякин Ю.И., Чигиринский Ю.Л., Лаврентьев А.М., Абакумова С.Ю., Ольштынский С.Н. Технология отделочно-упрочняющего ротационного обкатывания роликами длинных тонкостенных труб // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 10 (172). С. 31-39. doi: 10.30987/2223-4608-2025-10-31-39

Finishing and strengthening rotary running-in technology for long thin-walled pipes

Yuri I. Sidyakin¹, D. Eng.
Yuli L. Chigirinsky², D. Eng.
Alexander M. Lavrentiev³, engineer
Svetlana Yu. Abakumova⁴, engineer
Sergey N. Olshtynsky⁵, PhD. Eng.

^{1, 2, 4, 5} Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

³ Kamyshinsky Institute of Technology, branch of VolGSTU, Kamyshin, Russia

¹ y_sidyakin@mail.ru

² julio-tchigirinsky@yandex.ru

³ lamvstu@gmail.com

⁴ svetlanaforsc@gmail.com

⁵ for_lead22@mail.ru

Abstract. An analytical solution for the elastic plastic contact strain problem is proposed in relation to the processes of finishing and strengthening machining of long thin-walled pipes by rotary run-in using cylindrical and pseudospheric toroidal rollers. Technological and instrumental support of these processes is viewed. It contributes to the improvement of pipe surfaces quality and eliminates errors in the geometric shape of the cross-section. The conditions for self-feed of pipes being treated are determined. An algorithm has been developed for calculating rational modes of surface plastic deformation of long thin-walled pipes in the Mathcad software package, taking into account their special geometry and increased flexibility, as well as strict requirements for products in terms of accuracy of diametrical size and quality of treated surfaces. The proposed method for calculating some rational technological modes of finishing and strengthening treatment has been experimentally tested on thin-walled pipes (sometimes flattened to 1 mm in diameter) made of 30 steel with a hardness of HB160 with an initial surface roughness of $Ra = 1,25 \dots 1,6$ microns. The pipes were run-in using a 3-roller running-in device at a rotational speed of about 80 rpm with cylindrical rollers. The calculated rollers decline in the shell of the running-in device and the technological parameters of the processing mode made it possible, with a five...eightfold overlap of the initial trace of the tool tip, to ensure not only the conditions for self-feeding of the pipe and high process productivity, but also to obtain the required riveting depths and strain hardening degree for its surface. At the same time, the surface roughness decreased by almost an order of magnitude (to $Ra \leq 0,2$ microns) without noticeable traces of undulation and peeling, and the initial out-of-roundness of the pipe section was almost completely prevented. The developed rotary running-in technology for long thin-walled pipes is recommended for wide practical use in machine-building enterprises.

Keywords: thin-walled pipe, elastic plastic contact deformation, rotary run-in, toroidal roller

For citation: Sidyakin Yu. I., Chigirinsky Yu. L., Lavrentiev A.M., Abakumova S.Yu., Olshtynsky S.N. Finishing and strengthening rotary running-in technology for long thin-walled pipes / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 10 (172). P. 31-39. doi: 10.30987/2223-4608-2025-10-31-39

В настоящее время во многих отраслях народного хозяйства для изготовления изделий находят широкое применение полые тонкостенные профили различной формы поперечного сечения, в том числе и длинные тонкостенные трубы. К последним относятся трубопроводы гидравлических и топливных систем, узлов разнообразных теплообменных аппаратов, а также довольно широкая номенклатура несущих опорных конструкций, позволяющих наряду со снижением общей массы обеспечить им достаточную прочность и жесткость: перила и поручни лестничных пролётов, торговое и медицинское оборудование, элементы мебели и пр. Основными нормативными требованиями, предъявляемыми к длинным тонкостенным трубам, в большинстве перечисленных случаев являются низкая шероховатость поверхности ($Ra = 0,12 \dots 0,16$ мкм) и малые отклонения от круглости в пределах 0,1 мм при допуске на наружный диаметр по 14-му и более низким квалитетам.

В качестве заготовок для данных изделий используются стальные бесшовные холоднодеформированные и прямошовные электросварные

тонкостенные трубы. Сортамент этих труб предусматривает в состоянии поставки достаточно большие по значениям допуски размеров и формы и невысокие требования по шероховатости поверхности: для бесшовных холоднодеформированных труб допустимые предельные отклонения по наружному диаметру $\pm 0,2$ мм, для прямошовных – до $\pm 0,4$ мм. В аналогичных пределах регламентируется и допуск отклонений формы.

В машиностроительном производстве обработка длинных наружных цилиндрических поверхностей заготовок характеризуется значительной трудоемкостью и сложностью. Не исключением является и обработка длинных тонкостенных труб – полых цилиндрических изделий, у которых соотношение наружного диаметра и толщины стенки находится в среднем в пределах 12,5...40. К подобным тонкостенным изделиям можно отнести и стальные трубы диаметром менее 20 мм с толщиной стенки до 1,5 мм.

Обеспечение высокой производительности и надлежащего качества обработки таких заготовок, которым свойственна недостаточная

жесткость и повышенная склонность к значительным упругим изгибным деформациям, сопряжено с определенными технологическими трудностями. Поскольку основным и, пожалуй, единственным методом обработки длинных тонкостенных труб, обеспечивающим требуемый параметр шероховатости поверхностей, является круглое или бесцентровое шлифование с последующим полированием лепестковыми шлифовальными или войлочными кругами с нанесенными на них специальными полировальными пастами. Эта традиционная технология, осуществляемая, большей частью, в некомфортных условиях труда, является весьма трудоёмкой и требует повышенного расхода шлифовальных кругов в связи с невысокой твердостью материала труб и быстрым засаливанием кругов. Кроме того, такая технология не исправляет ряд других дефектов в виде разнообразных искажений геометрической формы как по длине, так и по поперечному сечению, возникающими вследствие некачественного хранения труб или их транспортировки.

В этих условиях повышение качества и производительности процессов обработки длинных тонкостенных труб с одновременным устранением дефектов в форме небольших вмятин, царапин и пр. видится только в применении отделочно-упрочняющих технологий, основанных на поверхностном пластическом деформировании (ППД), в частности, обкатки роликами. Этот способ достаточно успешно освоен на предприятиях многих отраслей машиностроения и применяется, в основном, для упрочняющей обработки сплошных и пустотелых валов с целью повышения их пределов выносливости [2 – 5]. Вследствие особой геометрии и повышенной гибкости тонкостенных труб, а также жестких требований к изделиям из них по точности диаметрального размера и качеству обработанных поверхностей нельзя полностью эту традиционную технологию ППД перенести на обработку тонкостенных изделий. Тем более, что для них строгое соблюдение показателей, ответственных за эффективность традиционных процессов ППД (приращение твердости поверхностного слоя, глубина наклёпа, степень упрочнения поверхности и пр.) специально не оговаривается, т.к. эти факторы не затрагивают должным образом

эксплуатационные и эстетические характеристики изделий. Вот почему обработка подобных изделий, основанная на деформационном упрочнении, должна проводиться при «щадящих» режимах, т. е. при умеренных контактных нагрузках с использованием обкатных роликов малой кривизны рабочего профиля для получения относительно малых степеней деформации поверхностного слоя, глубин наклёпа и остаточных пластических деформаций.

Для реализации подобных технологических процессов, которые должны отличаться ещё и повышенной производительностью, необходима существенная модернизация схемы обкатки с возможностью использования многороликового приспособления, соответствующее оборудование и обкатной инструмент специальной формы и размеров. А это, несомненно, приведёт и к изменению методики расчётного определения рациональных режимов обработки. На решение этих вопросов в сочетании с возможностью дополнительного упрочнения поверхностей тонкостенных труб направлено данное исследование.

К настоящему времени освоена и успешно применяется в машиностроении методика расчётного назначения рациональных режимов упрочняющей (УО) и отделочно-упрочняющей (ОУО) обработок сплошных валов путём обкатки тороидальными роликами, направленная, главным образом, на повышение пределов выносливости [3 – 5]. В связи с этим, научный и практический интерес представляет возможность установления условий и степени применимости этой методики к обработке длинных тонкостенных труб.

Несмотря на внешнюю общую сторону, присущую всем традиционным процессам ППД по их технологическому и инструментальному обеспечению, обработка длинных тонкостенных труб будет иметь свои специфические особенности, обусловленные, главным образом, низкой изгибной жесткостью и малой толщиной стенки «живого» сечения. При наружном D и внутреннем d диаметрах трубы абсолютная t и относительная $\bar{t}$ толщины её стенки определяются известными соотношениями (при $c = d/D$):

$$t = 0,5 D(1 - c); \bar{t} = 2t/(d + D) = (1 - c)/(1 + c), \quad (1)$$

при этом трубы могут считаться тонкостенными, если $\bar{t} < 0,10$.

Во всех отмеченных выше обработках деталей основными факторами, оказывающими влияние на эффективность рассматриваемых процессов, являются: толщина упрочненного поверхностного слоя, определяемая глубиной z_s

наклёпа, и степень деформации ϵ поверхности. Последняя является весьма важной деформационной характеристикой процессов ППД: она [3 – 5], определяется интенсивностью контактной упругопластической деформации ϵ_i , оптимальное значение которой на поверхности $\epsilon_{i,n}$ после обкатки должно приближаться при УО к

предельной равномерной деформации ε_p материала обрабатываемой детали, а при ОУО составлять порядка $(0,7...0,9)\varepsilon_p$.

Что касается глубины наклёпа z_s , то её значение, определяемое, большей частью, физико-механическими свойствами материалов и размерами упрочняемых деталей, назначается в соответствие с рекомендациями работ [3 – 5]. При этом вполне понятно, что эти рекомендации, включая и те, которые обычно используются для полых валов, не могут быть в полной мере перенесены на длинные тонкостенные трубы, технологические режимы обработки этих труб должны полностью исключить возможность выхода очага пластической деформации на их внутреннюю поверхность. Поэтому для ограничения радиальных размеров пластически деформированной области глубину z_s её распространения следует назначать такой, чтобы она не превышала толщину стенки трубы; т. е. с небольшим запасом.

Кроме того, как было отмечено выше, обработку данных труб также следует проводить при менее «жёстких» режимах, в отличие от применяемых при УО и ОУО валов. Для реализации подобных технологических операций и контроля требуемых параметров обработки необходимо воспользоваться, с одной стороны, проверенной

и хорошо зарекомендовавшей себя на практике методикой расчетного определения рациональных режимов ППД сплошных валов [3 – 5], а с другой – новым ротационным обкатным устройством повышенной производительности с автоматической подачей труб, подобным тому, конструкция и принцип действия которого описаны в работах [6, 7].

Расчётные схемы к определению геометрических и деформационных параметров упруго-пластического контактного взаимодействия тел для предлагаемого способа устранения отмеченных выше дефектов на длинных тонкостенных трубах путем их ротационного обкатывания торoidalными псевдосферическими (или полноконтактными) роликами, имеющими внешнюю вогнутую рабочую поверхность относительно малой кривизны приведены на рис. 1.

Силовое обжатие трубы 2 производится на специальном стенде несколькими роликами 1 (чаще тремя), которые размещены в общей обойме и равномерно распределены по окружности, лежащей в плоскости поперечного сечения трубы. Ролики могут свободно вращаться вокруг собственных осей и под действием радиальной нагрузки F перекашиваться по обрабатываемой поверхности.

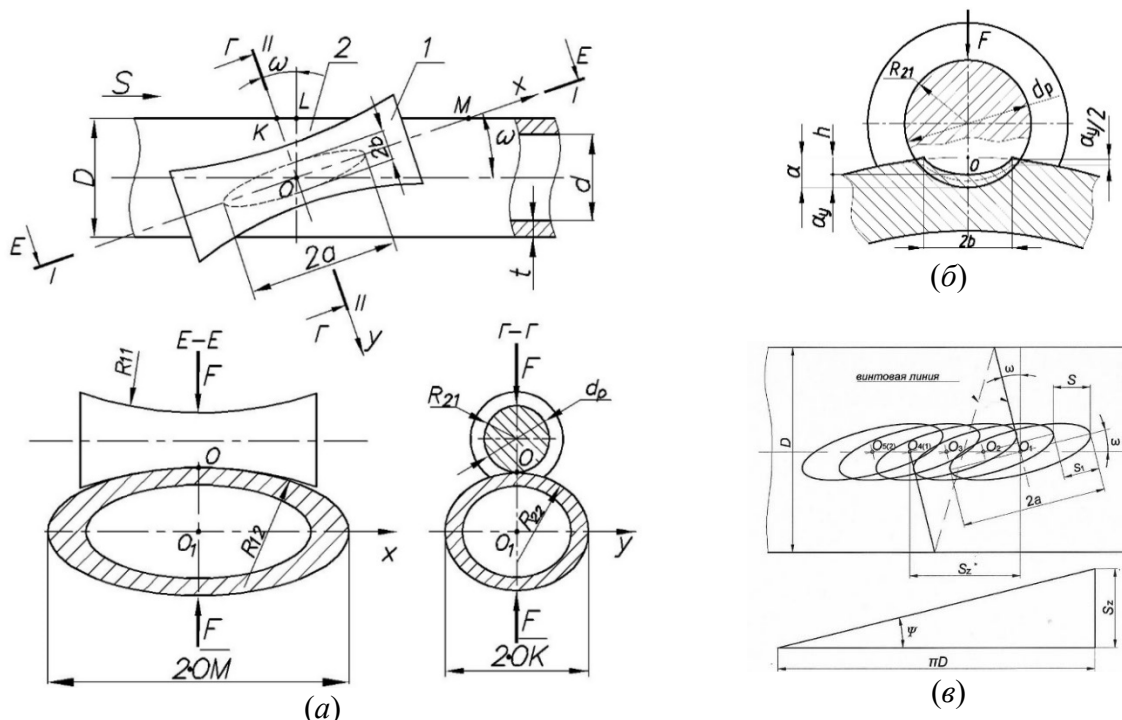


Рис. 1. Расчётные схемы к определению общих геометрических (а) и деформационных (б) параметров зоны упруго-пластического контактного взаимодействия, соотношения между углами установки роликов и подъёма средней винтовой линии (в) траектории качения роликов.

Fig. 1. Calculation schemes for determining the general geometric (a) and deformation (b) parameters of the elastic-plastic contact zone, as well as the ratio between the angles of roller installation and lifting of the median helical line (c) of the rolling path of the rollers

Оси роликов устанавливаются под углом ω (угол скрещивания) к оси трубы, в результате чего на начальном этапе контактного деформирования (до начала обкатки) на поверхности трубы под каждым роликом формируется очаг упругопластической деформации, распространяющийся на глубину z_s . После снятия нагрузки на поверхности остаётся небольшая вмятина, имеющая глубину h и близкий к эллиптическому контур с большой a и малой b полуосями. В процессе обкатки ролики формируют на трубе слабо выраженную винтовую поверхность жёлобообразного профиля малой кривизны, ход которой зависит от числа роликов, угла их установки и длины большой оси контура единичного отпечатка.

Для полного и равномерного деформирования всей поверхности трубы следует при каждом обороте обоймы с роликами обеспечить соответствующее многократное «перекрытие» контактной площадки, формируемой каждым из роликов. Поэтому ход S_z получаемой на поверхности трубы «виртуальной» винтовой линии не должен превышать размера контура остаточного отпечатка (рис. 1, в) и в лучшем случае составить величину

$$S_z = 2 \cdot a \cdot m \cdot \cos \omega / \kappa_n, \quad (2)$$

где κ_n – количество «проходов» всеми роликами поверхности начальной вмятины протяжённостью $2a$ за время одного полного оборота обоймы.

Следует заметить, что согласно исследованиям, проводимым в НПО «ЦНИИТМАШ» [2, 4] и относящихся к проблеме повышения

усталостной прочности валов при УО с использованием средств ППД, подача S инструмента, обеспечивающая получение минимальных высотных параметров шероховатости поверхности при обкатке тороидальным роликом с умеренными рабочими нагрузками, не должна превышать $0,10 \dots 0,12$ ширины следа, оставляемого роликом на поверхности вала. Применительно к рассматриваемой ротационной обкатке труб, где при деформировании протяжённость контура начальной вмятины относительно малой глубины в направлении подачи значительно превышает его ширину, это соотношение, в целом, также можно сохранить, полагая $\kappa_n \approx 9 \dots 6$. В этом случае продольная подача S каждого из m роликов будет составлять до $(0,11 \dots 0,16) 2a \cdot \cos \omega$. С учётом соотношения:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{2}{\pi} \operatorname{tg} \omega, \quad (3)$$

Данное выражение получается из равенства (рис. 1, в):

$$S_z = \pi D \operatorname{tg} \psi = 2D \operatorname{tg} \omega. \quad (4)$$

Взаимосвязь осевого перемещения трубы за один оборот обоймы с роликами (равно как и обоймы относительно трубы) с углами наклона ω роликов относительно оси трубы и подъёма ψ средней «виртуальной» винтовой линии, найдём верхнее предельное значение для угла установки роликов в обойме:

$$\omega \leq \arcsin \left(\sqrt{1 + \left(\frac{D\kappa_n}{2am} \right)^2} - \frac{D\kappa_n}{2am} \right) \approx \operatorname{arctg} \left(\frac{am}{D\kappa_n} \right). \quad (5)$$

Под действием сил трения, возникающих в зонах контакта роликов и трубы при коэффициенте трения f_k , последняя, преодолевая сопротивление поддерживающих и препятствующих её вращению опор с общим приведённым коэффициентом трения в них $f_{\text{пр.о.}}$, должна перемещаться в осевом направлении, обеспечивая себе самоподачу. Величина этого перемещения, аналогичного перемещению винта в многозаходной винтовой паре, где роль гайки выполняет опирающаяся на упорный шариковый подшипник обойма с роликами, за один её оборот равна ходу S_z . Виртуальной винтовой линии, формируемой роликами на поверхности трубы. Второе ограничение для угла ω вытекает из решения, определяющего возможность поступательного движения не вращающейся и свободно лежащей на опорах трубы весом Q_m под действием сил трения, возникающих в местах контакта всех роликов. При

обжатии трубы силами F со стороны каждого ролика осевая сила, движущая трубу, составит $m f_k F \sin \omega$, а сила сопротивления её перемещению $f_{\text{пр.о.}} Q_m$, поскольку действующие радиально по отношению к трубе силы F уравниваются и на опоры не передаются. Самоподача трубы будет обеспечиваться, если

$$\omega \geq \arcsin \left(\frac{f_{\text{пр.о.}} Q_m}{m f_k F} \right). \quad (6)$$

Расчётное определение силовых и деформационных параметров контактного взаимодействия тел и технологических режимов обкатки тонкостенных труб основано на закономерностях развития упругопластической контактной деформации применительно к процессам ППД [3]. При силовом контакте тел, ограниченных гладкими регулярными поверхностями произвольной формы и кривизны, в зоне сопряжения которых

возникает упругопластическая деформация, контур единичной остаточной вмятины глубиной h , образующейся на поверхности трубы в начальной стадии деформирования, после снятия контактной нагрузки F будет иметь форму близкую к эллипсу с большой a и малой b полуосями. Все эти параметры могут быть рассчитаны аналитически по методике работы [3].

При заданном значении F глубину h единичной остаточной вмятины (точнее, величину остаточного смещения центра контакта, поскольку отсчёт h ведётся от точки начального соприкосновения поверхностей, а не от плоскости слегка искривленного пространственного контура отпечатка) определяют по формуле

$$h = \frac{F - F_s}{\pi D_{\text{пр}} \text{НД}}, \quad (7)$$

где НД – пластическая твёрдость (твёрдость по

Дрозду) материала трубы; $D_{\text{пр}}$ – приведённый диаметр обкатного инструмента, зависящий от главных кривизн поверхностей контактирующих тел в точке их сопряжения; F_s – критическая нагрузка, при которой в центре контакта формирующейся под одним роликом вмятины зарождается пластическая деформация, её значение определяется по формуле [5, 6]:

$$F_s = \frac{\pi^5 (k_1 + k_2)^2 \sigma_T^3 D_{\text{пр}}^2}{3(1 - 2\mu_2)^3}, \quad (8)$$

где дополнительно $k_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{\pi E_1}$ и $k_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{\pi E_2}$ –

упругие постоянные материалов инструмента и трубы соответственно; μ_1 , μ_2 и E_1 , E_2 – их коэффициенты Пуассона и модули Юнга.

Для расчёта полуосей b и a контура и их отношения $\beta = b/a$ используют зависимости:

$$b = \sqrt{(2h + \alpha_y)/2B}; \quad a = \sqrt{(2h + \alpha_y)/2A} = b/\beta, \quad (9)$$

где α_y – упругая составляющая полного сближения α тел в контакте, определяемая уравнением:

$$\alpha_y = \sqrt[3]{\frac{9\pi^2}{8} \cdot \frac{(k_1 + k_2)^2 F^2}{D_{\text{пр}} (1 + 2h/\alpha_y)}}. \quad (10)$$

Решение удобнее представить в тригонометрической форме в зависимости от параметра $Q = \frac{243\pi^2 (k_1 + k_2)^2 F^2}{256 D_{\text{пр}} h^3}$ следующим образом:

$$\alpha_y = \begin{cases} \frac{2h}{3} \left[2 \cos \frac{1}{3} \arccos(2Q - 1) - 1 \right] & \text{при } Q < 1 \\ -\frac{2h}{3} \left[1 + 2 \sin^{-1} \left(2 \arctg \sqrt[3]{\frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{1}{1 - 2Q} \right)} \right) \right] & \text{при } Q \geq 1 \end{cases}. \quad (11)$$

Известно [2, 3], что форма и размеры контура остаточной вмятины существенно влияют на толщину наклёпанного слоя z_s материала. Для контроля значений z_s необходимо использовать хорошо зарекомендовавшее себя на практике применительно к стальным изделиям [3, 4] выражение

$$z_s = b \left[\frac{4}{5\beta^{1.5} + 3} \left(\frac{F}{ab\sigma_T} - \frac{17}{6 + \ln \beta} \right) \right]^{\frac{5}{10 + \ln \beta}}, \quad (12)$$

где дополнительно σ_T – предел текучести материала трубы; в случаях, когда $\beta \leq 0,10$, расчёт z_s следует также проводить по этой формуле, полагая в ней $\beta = 0,1$.

С другой стороны, значения глубин вмятины и наклёпа, а точнее – их отношение, определяют интенсивность остаточной контактной деформации $\varepsilon_{i,o}$ в центре отпечатка [3]:

$$\varepsilon_{i,o} = \ln \left(\frac{\varepsilon_{i,o}}{\Delta \varepsilon} \right) \frac{h}{z_s} = \ln(500 \varepsilon_{i,o}) \frac{h}{z_s}, \quad (13)$$

где $\Delta \varepsilon = 0,002$ – стандартный допуск на остаточную пластическую деформацию.

Выше упоминалось, что при отделочно-упрочняющей обработке деталей ППД значения $\varepsilon_{i,o}$ должны быть согласованы с предельной равномерной деформацией ε_p их материалов, и при обкатке тонкостенных труб составлять от неё лишь небольшую долю, т.е. $\varepsilon_{i,o} = \chi \varepsilon_p$; значения ε_p определяются стандартными испытаниями на растяжение или расчётом по приближенной [3], но достаточно точной, зависимости: $\varepsilon_p \approx 245/\text{НД}$.

Необходимо отметить, что согласно

исследованиям [3, 4] реализуемая на поверхности детали после обкатки интенсивность деформации $\varepsilon_{i,n}$ получается по значению несколько большей $\varepsilon_{i,o}$, что требует незначительной корректировки и уточнения по соотношению:

$$\varepsilon_{i,n} = k_\beta \varepsilon_{i,o}, \quad (14)$$

где k_β – коэффициент, учитывающий объёмный характер напряженно-деформированного состояния материала в очаге деформации под вмятиной на линии действия контактной нагрузки и возникающие при циклическом продвижении этого очага по обрабатываемой поверхности сдвиговые деформации; при обкатке со смазкой стальных валов значения этого коэффициента в среднем составляют $k_\beta = 1,0 \dots 1,1$, и поэтому в практических расчетах для тонкостенных труб при

малых β можно принимать $\chi \leq 0,6$ и $k_\beta \approx 1,05$.

Отсюда следует, что применительно к процессам ППД для реализации требуемого значения $\varepsilon_{i,o}$ необходимо на начальном этапе деформирования трубы обеспечить и контролировать глубину h единичной остаточной вмятины, отвечающей зависимости

$$h = \frac{\varepsilon_{i,o} z_s}{\psi_z \ln(500 \varepsilon_{i,o})}. \quad (15)$$

Главные кривизны A и B определяются алгебраической полусуммой кривизн поверхностей контактирующих тел в каждом из двух взаимно перпендикулярных сечений $E-E$ и $\Gamma-\Gamma$ плоскостями I и II соответственно (рис. 1, а), проходящими через точку O начального контакта; согласно [3, 4] и расчётной схемы на том же рисунке:

$$A = \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} \right) = \frac{1}{2} \left(-\frac{2 \sin^2 \omega}{nD} + \frac{2 \sin^2 \omega}{D} \right) = \frac{\sin^2 \omega}{D} \left(\frac{n-1}{n} \right), \quad (16)$$

$$B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{R_{22}} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{d_p} + \frac{2 \cos^2 \omega}{D} \right) = \frac{1}{d_p} + \frac{\cos^2 \omega}{D}, \quad (17)$$

где R_{ij} – радиусы кривизны поверхностей обкатного ролика 1 и трубы 2 (индексы j) в соответствующих плоскостях сечений (индексы i); d_p – диаметр ролика в плоскости качения; $n \geq 2$ – коэффициент, введённый в расчётную схему для обеспечения точечного контакта тороидального псевдосферического ролика с трубой независимо от угла ω его установки.

Поскольку в качестве A принимается величина, заведомо меньшая по значению из найденных по выражениям (16) и (17), то приведённые диаметр $D_{пр}$ (или радиус $R_{пр}$) обкатного инструмента, как чисто геометрические характеристики контактного взаимодействия тел [3, 4] при упругопластической деформации, определяются по формуле:

$$D_{пр} = 2R_{пр} = \beta/A, \quad (18)$$

$$\beta = \frac{2n_a n_b A/B}{n_\delta (1 + A/B)} \approx \sqrt{A/B}. \quad (19)$$

Значения коэффициентов n_a , n_b и n_δ находят решением [6] основного трансцендентного уравнения контактной задачи теории упругости:

$$\frac{K(e) - L(e)}{L(e)/(1 - e^2) - K(e)} = \frac{A}{B}. \quad (20)$$

В зависимости от величины отношения A/B и эксцентриситета $e = \sqrt{1 - (n_b/n_a)^2}$ эллиптического контура упругого отпечатка с большой a_o и малой b_o полуосями в предположении чисто упругого контактного взаимодействия рассматриваемых тел:

$$n_a = \sqrt[3]{\frac{2}{\pi \cdot e^2} \left(\frac{1 + A/B}{A/B} \right) \cdot (K(e) - L(e))}, \quad n_b = \sqrt[3]{\frac{2\sqrt{1 - e^2}}{\pi \cdot e^2} \left(1 + \frac{A}{B} \right) \cdot (L(e) - (1 - e^2)K(e))},$$

$$n_\delta = K(e) \cdot \sqrt[3]{\frac{4}{\pi^2} \left(\frac{A/B}{1 + A/B} \right) \cdot \frac{e^2}{K(e) - L(e)}}.$$

В приведенных выражениях $K(e)$ и $L(e)$ – полные эллиптические интегралы первого и второго рода соответственно, значения которых, как и зависящих от них коэффициентов n_a , n_b и n_δ , определяются либо по справочным таблицам, аналогичным приведённым в работе [3], либо рассчитываются с использованием программного комплекса Mathcad по значениям отношений главных кривизн поверхностей контактирующих тел.

Поскольку ротационная обработка труб проводится с малыми степенями деформации поверхностей при небольших углах установки роликов, то получаемые на начальном этапе деформирования на поверхности трубы неглубокие остаточные вмятины имеют достаточно вытянутые эллиптические контуры с большим эксцентриситетом, т.е. с малыми значениями β . В этой связи при расчётном определении приведенного диаметра ролика по формуле (18) необходимо пользоваться более точным выражением для β в уравнении (19), приближенное же применяется достаточно успешно только при УО или ОУО сплошных валов [4].

Технологическое обеспечение процессов ротационного обкатывания длинных тонкостенных труб заданных размеров (диаметр D и толщина стенки t) и известными механическими свойствами материала (предел текучести σ_T или твёрдость HD , предельная равномерная деформация ε_p) заключается в определении формы, геометрических размеров инструмента и рациональных режимов обработки. Форма обжимных роликов выбирается конструктивно: либо правильная цилиндрическая, либо тороидальная псевдосферическая, при этом последняя при прочих равных условиях является предпочтительней по обеспечению повышенной производительности процесса.

Расчётом производится назначение диаметра d_p роликов в плоскости обкатки, угла ω их установки и определение силы F обжатия труб. При этом контролируется и ряд других сопутствующих параметров рациональности техпроцесса, которые должны обеспечить получение требуемой степени упрочнения поверхности и заданной глубины наклёпанного слоя. Кратко, алгоритм расчётного назначения рациональных режимов ротационной обкатки длинных тонкостенных труб включает следующие операции:

1. Дополнительно к перечисленным выше исходным данным необходимо задаться значениями интенсивности деформаций: $\varepsilon_{i,o}$ в центре единичного остаточного отпечатка и $\varepsilon_{i,n}$ – на поверхности, кроме того, нужны толщина z_s наклёпанного слоя и угол ω установки роликов (предварительно рекомендуется принимать:

$\varepsilon_{i,o} = 0,4\varepsilon_p$, $z_s = 0,5t$ и $\omega < 15^\circ$).

2. Совместным решением уравнений (15) и приближённого (19) при неизвестном пока значении диаметра d_p обкатного ролика с учётом зависимостей (7) и (17) определяются вначале глубина h единичного отпечатка, а затем и диаметр ролика d_p с использованием программного комплекса Mathcad-7, после чего назначается его рациональное значение, и уточняются главные кривизны A и B поверхностей тел. Следует заметить, что принимаемое значение d_p должно быть не ниже расчётного и удовлетворять конструкции обкатного устройства, а для уменьшения волнистости обработанной поверхности, согласно рекомендациям [2], – быть, по возможности, кратным диаметру D трубы.

3. Решением трансцендентного уравнения (20) относительно эксцентриситета e контура упругой контактной площадки с привлечением программного комплекса Mathcad с подпрограммой $\text{root}(f(x), x)$ определяются значения коэффициентов n_a , n_b и n_δ ; затем по точной формуле (19) рассчитывается отношение полуосей β контура единичной остаточной вмятины, и далее по выражению (18) находится $D_{пр}$.

4. По выражению (7) с учётом (8) рассчитывается рабочая нагрузка F (сила обкатки), далее по уравнению (11) определяется упругая составляющая α_y полного сближения α тел в контакте, и по зависимостям (9) находятся полуоси a и b контура единичной остаточной вмятины, после чего уточняется принятый ранее угол ω установки роликов.

5. Контроль адекватности полученного решения осуществляется по удовлетворительному совпадению значений принятой и рассчитанной по уравнению (12) глубинам наклёпа z_s . При несовпадении проводится небольшая корректировка значений, принятых ранее коэффициентов χ и ξ в рекомендуемых пределах. В заключении определяется реальное перекрытие роликами начального отпечатка длиной $2a$, оцениваемое коэффициентом k_n , значение которого должно быть не менее 6-х при 3-х роликовом обкатном устройстве [10].

Экспериментальная проверка предлагаемой методики расчёта рациональных режимов отделочно-упрочняющей обкатки проводилась на предварительно очищенных от заметных следов коррозии и окалины прямошовных тонкостенных трубах из стали 30 ($D = 32$ мм и $d = 27$ мм, твёрдость $HB160$, $\varepsilon_p = 0,134$, шероховатость поверхности $R_a = 1,25 \dots 1,6$ мкм), мечами сплюснутых до 1 мм по диаметру, с использованием 3-х роликового обкатного устройства при частоте вращения обоймы с цилиндрическими роликами около 80 об/мин. Расчётные

параметры режима обработки: диаметр упрочняющих роликов $d_p = 16$ мм, которые были установлены углом $\omega = 7,5^\circ$, и сила обкатки $F = 1,87$ кН обеспечивали глубину наклёпа $z_s \approx 1,4$ мм (т.е. $\approx 0,56t$) и степень деформации поверхности $\varepsilon_{i,n} \approx 0,25\varepsilon_p$, при этом происходило почти 8-кратное ($\kappa_n \approx 5,0$) перекрытие начального отпечатка ($2a = 22,06$ мм и $2b = 1,37$ мм) без заметных следов волнистости обработанной поверхности. Кроме того, шероховатость поверхности снизилась почти на порядок (до $R_a \leq 0,2$ мкм), а некруглость сечения практически совсем исчезла.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 8733-75. Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные и теплодеформированные (технические требования); ГОСТ 10704-91. Трубы стальные электросварные прямошовные (сортамент).
2. Браславский В.М. Технология обкатки крупных деталей роликами. М.: Машиностроение. 1975. 160 с.
3. Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. М.: Машиностроение. 1986. 224 с.
4. Сидякин Ю.И. Разработка метода расчета упругопластических контактных деформаций в процессах упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: ЦНИИТМАШ. 2002. 34 с.
5. Сидякин Ю.И. Повышение эффективности упрочняющей механической обработки валов обкаткой их роликами или шариками // Вестник машиностроения. 2001. № 2. С. 43–49.
6. Sidiyakin Y.I., Olshtynsky S.N., Abakumova S.Y. Application of smoothing rollers in processes finishing-strengthening treatment of shafts' SPD // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. 2020. P. 1213–1222. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_129
7. Отенный Я.Н., Никифоров Н.И., Алабин В.А., Лаврентьев А.М. Обеспечение точности формы при обработке ротационным обкатыванием длинных тонкостенных труб // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 7. С. 12–16.
8. Коновалов Е.Г. Ротационная обработка поверхностей с автоматической подачей. Минск: Высшая

школа. 1976. 192 с.

9. Сидякин Ю.И. Сферическая модель исследования упругопластической контактной деформации. // Известия ВолгГТУ. Прогрессивные технологии в машиностроении, вып. 6, № 12 (72). ВолгГТУ. Волгоград. 2010. С. 48–52.

10. Отенный Я. Н. Обеспечение точности формы при обработке ротационным обкатыванием длинных тонкостенных труб // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 7. С. 12–16.

REFERENCES

1. State Standard 8733-75. Weldless steel pipes, cold-formed and heat-formed (technical requirements); State Standard 10704-91. Electric-welded steel LSAW pipes (grade).
2. Braslavskiy V.M. Technology of rolling large parts using rollers. Moscow: Mashinostroenie. 1975. 160 p.
3. Drozd M.S., Matlin M.M., Sidiyakin Yu.I. Engineering calculations of elastic-plastic contact deformation. Moscow: Mashinostroenie. 1986. 224 p.
4. Sidiyakin Yu.I. Development of methods for calculating elastoplastic contact deformations in the processes of hardening of parts by surface plastic deformation. Moscow: TSNIITMASH. 2002. 34 p.
5. Sidiyakin Yu.I. Improving the efficiency of rollers hardening by treating with rollers or balls // Bulletin of Mechanical Engineering. 2001. no. 2. P. 43–49.
6. Sidiyakin Y.I., Olshtynsky S.N., Abakumova S.Y. Application of smoothing rollers in processes finishing-strengthening treatment of shafts' SPD // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. 2020. P. 1213–1222. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_129
7. Oteniy Ya.N., Nikiforov N.I., Alabin V.A., Lavrentiev A.M. Ensuring the accuracy of the form of rotary processing of long thin-walled tubes // Hardening technologies and coatings. 2012. no. 7. P. 12–16.
8. Kononov E.G. Rotary surface treatment with automatic feeding. Minsk: Higher School. 1976. 192 p.
9. Sidiyakin Yu.I. Spherical model of elastic plastic contact deformation research. //Izvestia of VolgSTU. Progressive Technologies in Mechanical Engineering, issue 6, no. 12 (72). VolgSTU. Volgograd. 2010. P. 48–52.
10. Oteniy Ya.N. Ensuring shape accuracy during rotary rolling of long thin-walled pipes //Hardening technologies and coatings. 2012. No. 7. pp. 12–16.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.03.2025; одобрена после рецензирования 08.04.2025; принята к публикации 12.05.2025.

The article was submitted 22.03.2025; approved after reviewing 08.04.2025; assepted for publication 12.05.2025.