

## К ВОПРОСУ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБ НА СТАНАХ ХПТ

Гармашев Д. Ю.<sup>1)</sup> /к. т. н./, Подлозний А. В.<sup>2)</sup> /к. т. н./, Сокурченко В. П.<sup>2)</sup> /д. т. н./, Рахманов С. Р.<sup>3)</sup>, Живцов С. П.<sup>2)</sup> /к. т. н./

<sup>1)</sup>ООО "ИНТЕРПАЙП Украина"

<sup>2)</sup>ГП "Научно-исследовательский технологический институт трубной промышленности им. Я. Е. Осады"

<sup>3)</sup>Национальная металлургическая академия Украины

*Підвищення техніко-економічних показників холодної пілігримової прокатки труб є сьогодні актуальним завданням. Вона обумовлена циклічністю виробництва, обов'язковим застосуванням термічної обробки і т. п. У даній роботі розглянуті технологічні прийоми які сприяють підвищенню пластичності металу труб при холодній деформації. Перспективним є спосіб пілігримової прокатки з цикліруванням.*

**Ключові слова:** холодна прокатка труб, технологія, маршрут прокатки, ступінь деформації, пластичність металу, механічні властивості.

*Increased technical and economic indicators of cold Pilger rolling tube an urgent task is today. It is due to cyclical production, the mandatory application of heat treatment, etc. In this paper processing methods that improve the plasticity of the rolled metal pipes for cold deformation. A promising method is Pilger rolling cycling.*

**Key words:** cold rolling of pipes, technology, rolling route, degree of deformation, ductility of metal, mechanical properties.

*Повышение технико-экономических показателей холодной пилигримовой прокатки труб является сегодня актуальной задачей. Она обусловлена цикличностью производства, обязательным применением термической обработки и т. п. В данной работе рассмотрены технологические приемы, способствующие повышению пластичности прокатываемого металла труб при холодной деформации. Перспективным является способ пилигримовой прокатки с циклированием.*

**Ключевые слова:** холодная прокатка труб, технология, маршрут прокатки, степень деформации, пластичность металла, механические свойства.

Ведение эффективного ресурсосберегающего процесса холодной пильгерной прокатки труб на станах ХПТ требует точных данных о том, как будут изменяться механические свойства металла в ходе реализации технологического процесса. Особо-актуальным в рассматриваемом процессе холодной пильгерной прокатки труб является то, что, значительные силы прокатки, приводящее к увеличению массы валков, рабочей клетки и других подвижных элементов. Это в свою очередь вызывает значительный рост динамических нагрузок и увеличению мощности, потребляемой станом ХПТ на реализации процессов холодной пильгерной прокатки. Отметим, что, при этом важную роль играют пластические свойства металла, которые позволяют подвергаться большим степеням деформации без разрушения.

Особенностью процесса холодной пильгерной прокатки, с точки зрения определенных механических свойств прокатываемого металла, является то, что рабочий конус при холодной пильгерной прокатке состоит из последовательно взаимосвязанных мгновенных очагов с небольшой частной деформацией. При этом конечные геометрические размеры, напряженно-деформированное состояние и температура для предыдущего очага деформации являются начальными параметрами для следующего.

Анализ действующих на заводах Украины маршрутов и калибровок рабочего инструмента станов ХПТ показал, что основная масса холоднокатаных

подшипниковых труб изготавливается из горячекатаной заготовки с вытяжкой, не превышающей 2,2. Причем в зависимости от типа стана и прокатываемой номенклатуры заказов большая часть размеров производится в 2 цикла прокатки с промежуточной термической обработкой. Такое положение в сегодняшних условиях формирует актуальную задачу разработки ресурсосберегающих технологий и процессов.

Сопrotивление деформации, как исходная мера интенсивности напряжений в металле, является необходимым и достаточным параметром для осуществления процесса пильгерной прокатки труб. Отметим то, что в качестве меры сопротивления пластической деформации является фундаментальной характеристикой поведения металла при холодной пильгерной прокатке, связанной с физической природой прокатываемого металла [1].

На предприятиях, производящих трубы холодной пильгерной прокаткой, основные параметры режима деформации определяются следующим образом.

При холодной пильгерной прокатке в качестве базового параметра деформации металла, как правило, принимают величину предела прочности  $\sigma_b$  или предела текучести  $\sigma_t$  ( $\sigma_{0,2}$ ), определяемую при стандартных испытаниях образцов на разрыв, с коэффициентом вытяжки 1,15, характеризующим известную схему и хорошо представляемую двухмерную напряженное состояние [2].

Действительно, при стандартных испытаниях на разрывных машинах скорость деформации составляет  $5 \cdot 10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ , а при прокатке  $5 \dots 400 \text{ с}^{-1}$ . Однако в действительности схема напряженного состояния при испытаниях на разрывной машине не соответствует схеме напряженного состояния при ХПТ. На неправомочность использования  $\sigma_v$  и  $\sigma_t$  в указанной постановке указана, в работе [3]. По мнению авторов, в процессе стандартных испытаний условия деформации выбранных образцов не соответствуют условиям реального очага деформации, имеющим место при реализации процессов холодной пильгерной прокатки труб.

Кроме того, стандартные испытания производятся практически в изотермическом режиме, тогда как в реальном очаге деформации холодной прокатки температура металла изменяется в широких пределах и в ряде случаев достигает  $500\text{--}600^\circ\text{C}$ , а для некоторых металлов (сплавов) и более.

Характер изменения механических свойств металла в процессе холодной пильгерной прокатки определяется такими основными факторами: степень деформации; начальное значение и приращение температуры металла по длине рабочего конуса; дробность деформации; схема напряженного состояния металла в мгновенном очаге деформации и др. [1].

Учет влияния степени деформации на свойства металла связан в первую очередь с упрочнением (наклепом), имеющим место при холодной деформации металла. В то же время, последовательное прохождение металла через мгновенные очаги деформации приводит к значительному росту температуры металла и интенсификации различных процессов изменения структуры [4].

Маршрут прокатки распределяют по соответствующим проходам, необходимые для получения заданного размера труб из заданного размера заготовки, и величины коэффициента вытяжки за каждый проход.

При проектировании выбранного маршрута прокатки в настоящее время исходят из размера трубы-заготовки, характеристик соответствующего стана ХПТ и степени деформации, допускаемой за проход данным материалом заготовки. Как правило, при этом металлы с примерно близкими пластическими характеристиками объединяют в локальные группы.

Действующие маршруты прокатки на производстве сложились в результате многократного экспериментального опробования возможной деформации металла за проход с учетом унификации промежуточных размеров труб и действующей методики расчета калибровки.

Распределение частных деформаций по длине рабочего конуса в пределах маршрута прокатки определяется профилем ручья и оправки – калибровкой инструмента. Современные калибровки инструментов (калибров и оправки), учитывающие

интенсивность изменения напряжения текучести металла по длине рабочего конуса, например, калибровка типа КПО, позволяют увеличить степень использования ресурса пластичности металла в условиях повышенных деформаций за проход при удовлетворении самых высоких требований к качеству труб.

Допустимая степень деформации металла за проход, наряду с другими факторами, определяется соотношением деформации по диаметру и толщине стенки. Преимущественная деформация по диаметру или толщине стенки приводит к повышению интенсивности упрочнения. Из параметров оборудования станов типа ХПТ на режим деформации влияют, длина рабочей части ручья калибров и катящий радиус рабочего вала. Соотношение этих показателей для действующих станов составляет  $2,5 \dots 3,5$ . Для повышения качества труб и снижения сил прокатки, при прочих равных условиях, необходимо увеличение данного соотношения [5].

Настоящее исследование направлено на анализ существующих технологических процессов, в которых разупрочнение и восстановление пластических свойств металла происходит в процессе пластической деформации за счет применения деформирующего инструмента специальной формы без дополнительных энергоемких операций.

При пластической деформации металла в холодном состоянии происходит упрочнение металла и снижается его технологическая пластичность. Вытяжки для станов ХПТ, достигаемые при холодной пильгерной деформации за один цикл, в настоящее время не превышают 5,0. При этом степень деформации металла соответственно находится в пределах примерно 80%.

Высокая пластичность металла при холодной прокатке труб возможна благодаря следующим факторам: использованием в качестве заготовки металла, прошедшего рекристаллизационный отжиг, высокой дробностью деформации и благоприятной схемой напряженного состояния. Исследования изменения структуры и твердости металла по длине рабочего конуса необходимы для экспертной оценки процесса [6] и использовании результатов при разработке технологии прокатки.

В основном восстановление пластических свойств металла для дальнейшей деформации осуществляется путем термической обработки, которая производится в специальных печах за счет нагрева до точки  $A_{с3}$ , после чего проводятся операции отдели и химической подготовки к следующему циклу прокатки или волочения. На это затрачивается до 50% энергии, расходуемой на изготовление труб требуемого размера.

С использованием разупрочняющей обработки могут решаться различные технологические задачи, направленные на достижение тех или иных целей с учетом возможностей способа и целесообразности его применения в конкретном случае.

Для снижения количества циклов деформации и операций, связанных с восстановлением технологической пластичности металла, в "ГТИ" (Государственный Трубный Институт) было разработано несколько подходов.

На исходный уровень свойств металла и его начальное сопротивление деформации, кроме типа кристаллической решетки, его структуры, обеспечиваемой предшествующей термообработкой, в значительной степени влияет температура, с которой металл входит в очаг деформации [7-9]. Температура прокатываемого металла в процессе холодной и теплой пильгерной прокатки определяет как уровень напряжения текучести, так и пластические свойства – способность металла деформироваться без разрушения. Кроме того, многие материалы в диапазоне до температур рекристаллизации имеют температурно-деформационные интервалы, в которых процесс упрочнения замедляется и проходит менее интенсивно. Наиболее выражено такой эффект проявляется у сталей аустенитного класса – например для нержавеющей стали X18H10T.

Как правило, для сталей аустенитного класса наблюдается монотонное снижение напряжения текучести при температурах начала деформации до 350°C. Такое яркое проявление эффекта теплой деформации [1, 10-14] у аустенитной стали послужило базой для создания способа теплой прокатки труб, основной отличительной чертой которого стал нагрев трубы-заготовки непосредственно перед входом в валки. Жидкостное охлаждение рабочего конуса эмульсией, которое характерно для холодной прокатки, при этом отсутствует.

Для значительного повышения технологической пластичности прокатываемого металла, интенсификации режимов деформации и повышения производительности станов ХПТ был разработан (Попов М. В.) и исследован (Вахрушева В. С.) способ холодной пильгеримовой прокатки с деформацией по диаметру и толщине стенки одновременно в двух парах ручьевых калибров на оправке стана ХПТ-ТАНДЕМ.

Результаты эксплуатации станов с четырехвалковыми клетями показали ряд преимуществ нового способа прокатки в сравнении с однорядной прокаткой: увеличение производительности процесса в 1,6...1,8 раза, увеличение суммарной выработки металла за двойной ход клетки в 1,5...2 раза, что обуславливает возможность существенного сокращения цикличности производства (числа промежуточных технологических операций – термообработки, травления, правки и т. д.), вместе с тем значительно возрастает точность размеров труб и улучшается качество поверхности, снижается расход металла.

Одной из причин повышения производительности и сокращения цикличности производства является снижение деформирующих усилий при прокатке труб в клетях с двумя парами валков, позволяющее значительно увеличить обжатие металла за цикл деформации.

В процессе реализации процесса определены закономерности формирования дислокационной

структуры при холодной прокатке труб на станах ХПТ с двумя парами валков. Установлено, что снижение сопротивления пластической деформации и увеличение технологической пластичности металла при холодной двухрядной прокатке труб обусловлено действием знакопеременных нагрузок растяжения-сжатия сопровождающихся постоянным незначительным скручиванием, возникающих при одновременной деформации в двух парах валков. Действие знакопеременных циклических нагрузок (амплитуды и количества циклов) при холодной двухрядной прокатке труб приводит к развитию при деформации релаксационных процессов и формированию более равновесной ячеистой дислокационной структуры. Влияние структурного состояния и параметров циклического нагружения (амплитуды и количества циклов) при знакопеременной деформации приводит к некоторому разупрочнению прокатываемой стали и повышению ее пластичности.

Наряду с таким широко распространённым способом снятия наклепа и тем самым повышения пластичности прокатываемой стали как отжиг при высоких температурах, существует и другой подход (Подлозный А. В.) – циклирование труб. Проведенные эксперименты показали, что при циклировании труб в двух взаимно-перпендикулярных направлениях наблюдается разупрочнение металла труб. Фактическим объяснением этого факта является эффект Баушингера, т. е. при циклировании труб в двух взаимно-перпендикулярных направлениях происходит такое изменение свойств металла, которое ведет к повышению пластичности материала труб [15].

Если за базу критерия пластичности материала принять удлинение при растяжении, величина которого характеризует способность материала к дальнейшему пластическому деформированию и определяется суммарной степенью деформации кольцевого образца (поперечного сечения прокат-головки), то наличие зависимости коэффициента разупрочнения от параметров процесса прокатки позволяет с использованием разработанных методов рассчитать и изготовить рабочие инструменты (калибры и оправку) стана ХПТ с зонами разупрочнения, обеспечивающий осуществление заданных режимов деформирования и рациональное использование ресурса пластичности материала при холодной пильгерной прокатке труб.

Практическая ценность результатов работы заключается в том, что установленные закономерности упрочнения и разупрочнения металла в процессе холодной прокатки труб позволили разработать режимы деформации при прокатке труб из различных марок стали, что обеспечило повышение технологической пластичности прокатываемого металла в 1,5...2 раза, сокращение цикличности производства труб (исключение прохода деформации и последующей термообработки, травления и сопутствующих операций).

Специалистами "ГТИ" был разработан для условий опытного завода, опробован процесс

холодной однорядной пильгерной прокатки труб, при котором восстановление технологической пластичности металла происходит непосредственно в очаге деформации за счет создания специальных в очаге деформации зон, путем применения соответствующей калибровки валков и оправки, в которых прокатываемый металл подвергается разупрочнению.

Проведенные многочисленные лабораторные исследования на производственных площадках ОЗ "ГТИ", ТВЦ "НЮТЗ" и "НТЗ" показали, что при реализации процесса циклирования, на участках разупрочнения предел текучести, например, стали 20 [15], может снижаться на 40-45% от достигаемого уровня при соответствующей степени деформации. Величина такого снижения зависит от параметров процесса прокатки. Создание условий разупрочнения металла при холодной прокате труб на прокат-головке обеспечивается зонами, в которых происходит изменение формы прокат-головки при отсутствии вытяжки. В этих зонах происходит знакопеременная деформация прокат-головки, что обуславливает повышение технологической пластичности металла. Причем, наиболее интенсивное изменение пластичности происходит на первых 2...3 циклах изменения формы изделия.

По данным ряда экспериментальных исследований проведенных авторами установлено, что при знакопеременной циклической деформации кольцевых образцов, обусловленной их сплющиванием (изменением формы при отсутствии вытяжки), разупрочнение присуще не только стали 20, но и стали ШХ-15, титановым или циркониевым специальным сплавам. Подтверждено положение, приведенное в литературных источниках, о том, что склонность металлических материалов к упрочнению или разупрочнению при циклическом деформировании со сменой знака напряжения определяются отношением временного сопротивления  $\sigma_b$  к условному пределу текучести  $\sigma_{0.2}$ . При  $\sigma_b/\sigma_{0.2} < 1,2$  материалы разупрочняются при циклическом деформировании, при  $\sigma_b/\sigma_{0.2} \geq 1,4$  - упрочняются.

Для каждого из исследуемых материалов полученные зависимости не отличаются одна от другой качественно, но существенно отличаются количественно.

Так, с увеличением величины данных параметров в исследуемом диапазоне их изменения коэффициенты разупрочнения увеличиваются, но увеличиваются в разной степени для каждого из исследуемых материалов. Кроме этого, по данным литературных источников разупрочнение возрастает при знакопеременном нагружении с увеличением температуры деформируемого тела.

#### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Фролов В. Ф. Холодная пильгерная прокатка труб: Монография / В. Ф. Фролов, В. Н. Данченко, Я. В. Фролов. – Днепропетровськ : "ПОРОГИ", 2005. – 258 с.
2. Целиков А. И. Теория прокатки / А. И. Целиков, А. И. Гришков. – М. : Металлургия, 1970. – 310 с.
3. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов / С. И. Губкин. – М. : Металлургиздат, 1961. – 289 с.

Наиболее интенсивное увеличение коэффициентов разупрочнения всех исследованных материалов происходит на первых 2...4 полуциклах изменения формы кольцевых образцов. Это открывает принципиальную возможность использования эффекта разупрочнения металла при прокатке труб на станах ХПТ, что подтверждено результатами прокатки на стане ХПТ 55 труб из стали 20 с вытяжкой 11,3 за один проход [15].

Из литературы известно, что интенсивные деформации при прокатке подшипниковых труб на станах ХПТ повышают эксплуатационные характеристики подшипников [16]. Кроме этого, повышенные деформации при прокатке труб на станах ХПТ из подшипниковой стали ШХ-15 существенно снижают бальность карбидной сетки, что положительно сказывается на стойкости подшипников.

Таким образом, повышение вытяжек за проход и снижение цикличности производства холоднодеформированных подшипниковых труб представляет актуальную задачу, что обуславливает целесообразность применения в этом случае разупрочняющей обработки.

На стане ХПТ-90 ПАО "ИНТЕРПАЙП НТЗ" прокатано 50 м труб из стали ШХ-15 по маршруту  $81 \times 13 \rightarrow 41,3 \times 8$  в валках с двумя зонами разупрочнения. Показана принципиальная возможность прокатки труб с вытяжкой 4,0 и более. Однако для достижения таких вытяжек в промышленных условиях еще предстоит решить вопросы, связанные с образованием и отводом тепла, интенсивно выделяемого при холодной деформации металла, особенно при прокатке труб из стали ШХ-15.

Температурный режим прокатки является одним из основных факторов, определяющих свойства прокатываемого металла, его деформируемость, стойкость рабочего инструмента, работоспособность смазки, энергозатраты при прокатке, производительность стана и качество труб. В связи, с чем необходимым становится разработка эффективных систем охлаждения труб в процессе прокатки, в особенности мере при прокатке с циклированием.

Применение разупрочняющей обработки металла давлением непосредственно в очаге деформации при прокатке позволяет реализовать ресурсосберегающие процессы производства труб и, тем самым, обеспечить повышение технико-экономических показателей инновационных технологических процессов холодной пильгерной прокатки труб: не требуется оснащение станом индукторами, не требуется установка новых клетей с двумя парами валков и т.п. Особенно это касается технологии прокатки труб из специальных сталей и их сплавов (титана, сплавов циркониевых и др.).

4. Бровман М. Я. Определение сопротивления деформации при прокатке / М. Я. Бровман, А. Ф. Мельников // Инженерные методы расчета технологических процессов обработки металлов давлением : Сб. научн. тр. – М. : Metallurgizdat, 1963. – С. 418-422.
5. Определение режима деформации при теплой пильгерной прокатке котельных труб с однородной структурой / Я. В. Фролов, Ю. Ю. Мацко, Ю. Ж. Шпак, И. А. Панасенко // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 8. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ: Системні технології, 2005. – С. 419-424.
6. Зильберг Ю. В. Определение напряжения текучести по экспериментальным значениям среднего давления / Ю. В. Зильберг, Я. В. Фролов // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 5. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ : Системні технології, 2002. – С. 186-190.
7. Грудев А. П. Об экспериментальном определении среднего удельного давления при холодной прокатке / А. П. Грудев // Научные труды ДМетИ. – М. : Metallurgiya, 1975. – Вып. XXVII.
8. Экспертная оценка процесса холодной пильгерной прокатки труб / В. У. Григоренко, Б. П. Середа, И. В. Кругляк, А. С. Нагний // Металургія: наукові праці ЗДІА. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2006. – Вип. 13. – С. 80-86.
9. Бельченко Г. И. Основы металлографии и пластической деформации стали / Г. И. Бельченко, С. И. Губенко. – К. : Вища шк., 1987. – 240 с.
10. Грудев А. П. К определению среднего предела текучести при холодной прокатке с учетом разогрева металла / А. П. Грудев, Ю. Б. Сигалов // Металлургия и коксохимия. – 1971. – № 27. – С. 68-71.
11. Фролов В. Ф. Пути интенсификации прокатки труб на станах ХПТ / В. Ф. Фролов, Т. В. Сенина, Я. В. Фролов // Металлургическая и горнорудная промышленность. –1998. – № 4. – С. 41-44.
12. Теплая прокатка нержавеющей труб / О. А. Семенов, Н. С. Алферова, Г. Я. Острин, В. Ф. Фролов, А. К. Сатылик, С. М. Мясоед. – Днепропетровск : Промінь, 1965. – 62 с.
13. Kazanecki J. Die optimale Temperatur Warmpilgerwalzung der Rohren // Bander-Bleche-Rohre. – 1986. – № 6. – Р. 111-114.
14. Теплая деформация металлов / А. Р. Орлов и др. – Мн. : Наука и техника, 1978. – 216 с.
15. Отчет о НИР ГТИ №183-94 (0194U019916). Исследование напряженно-деформированного состояния трубы при различных схемах циклического нагружения, приводящих к разупрочнению металла и повышению деформируемости (заключительный). Днепропетровск. 1995. – 38с.
16. Попов В. М. Совершенствование процесса периодической прокатки труб / В. М. Попов, С. В. Атанасов, Ю. М. Беликов. – Днепропетровск : Дива, 2008. – 191 с.