

УДК 621.774.36

**Мищенко А. В.  
Григоренко В. У.****РАЗВИТИЕ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ  
РАЗНОСТЕННОСТИ ПРИ МНОГОПРОХОДНОЙ ПРОКАТКЕ ТРУБ ИЗ СПЛАВОВ  
НА ОСНОВЕ ТИТАНА НА СТАНАХ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ**

Трубы из сплавов на основе титана широко применяются в медицине, судостроении, высокоточном приборостроении, авиации и энергетике.

В последние годы все больше продукции производится по более жестким требованиям к точности геометрии поперечного сечения. Это связано со стремлением получить конструкции с минимальным весом при максимально возможных механических свойствах. Использование труб из сплавов на основе титана является перспективным, поскольку использование титановых материалов позволяет в несколько раз снизить вес механизмов при равных механических свойствах изделия сравнимо со сталями или получить более высокие технические свойства изделий у одинаковых конструкций.

Станы холодной прокатки труб должны обеспечивать получение регламентированной точности размеров изготавливаемых труб.

Однако из-за использования горячекатаной заготовки с большой поперечной разностенностью получение труб надлежащего качества нуждается в проведении дополнительных операций, которые ведут к увеличению расхода материалов.

В последних исследованиях по тематике разностенности уделено внимание изменению эксцентричной разностенности в зоне редуцирования [1–4] и игнорировалась зона обжатия стенки.

Из-за особенностей сплавов на основе титана их деформация проходит в основном на оправке. Анализ работ по изменению разностенности показал недостаточную освещенность данного вопроса.

Нерешенным вопросом является прогнозирование поперечной разностенности именно для прокатки с преобладающей зоной обжатия на оправке.

Цель работы. Для понимания процесса протекания изменения эксцентричной разностенности при холодной прокатке труб на оправке, из сплавов на основе титана, необходимы зависимости, описывающие уменьшение разностенности, что позволит выполнять расчеты по прогнозированию разностенности при многопроходной холодной прокатке.

Результаты исследования. Был описан механизм уменьшения эксцентричной разностенности и создана математическая модель процесса деформации разнотолщинных образцов между плитами, подобная очагу деформации стана ХПТ [5]. Геометрические параметры модели и все граничные условия были заданы согласно условиям прокатки, на стане ХПТ.

По аналогии с математическим моделированием был проведен лабораторный эксперимент по осадке разнотолщинных образцов из сплава Grade 5. Деформирующий инструмент для эксперимента был изготовлен и приведен к полному соответствию по механическим характеристикам и чистоте поверхности к характеристикам инструмента стана ХПТ.

Данные по уменьшению поперечной разностенности полученные с такого эксперимента были сходны с данными полученным при математическом моделировании (рис. 1). Это позволило проанализировать и подтвердить подобность и адекватность модели в сравнении с реальным процессом.

Для сопоставления теоретических и лабораторных данных был проведен промышленный эксперимент с серией прокаток на станах ХПТ. Для наглядности переведем данные математического моделирования в графический вид и добавим данные полученные на промышленном стане ХПТ-55. Из графиков (рис. 2) мы видим, что характеристики падения разностенности для математического моделирования и производственного эксперимента подобны. Это ещё раз подтверждает правильность и адаптивность модели сопоставимо к реальному процессу.

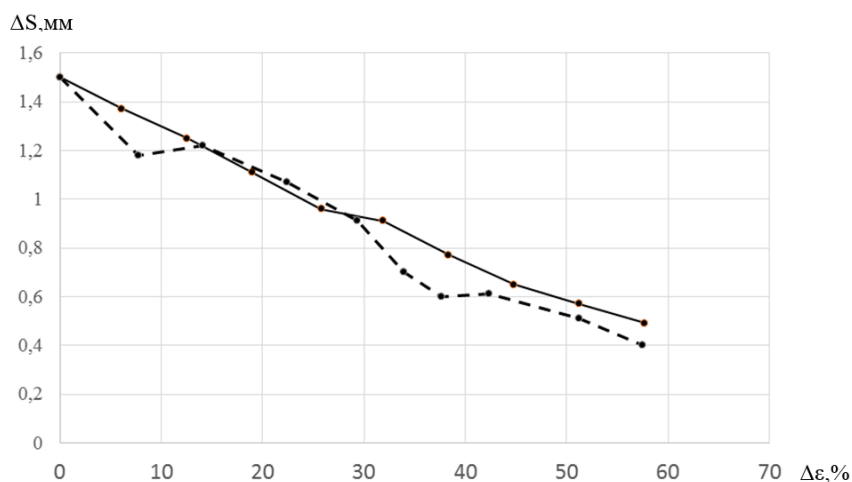


Рис. 1. Теоретическая и экспериментальная зависимости снижения абсолютной разнотолщинности образцов при осадке в зависимости от суммарной относительной деформации: сплошная линия – математическое моделирование процесса, штрихпунктирная линия – данные лабораторного эксперимента

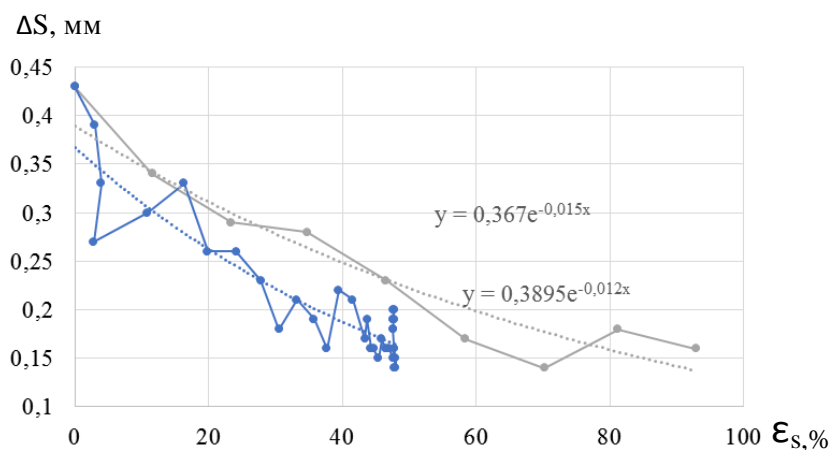


Рис. 2. Сравнение уменьшения абсолютной разнотолщинности при математическом моделировании и прокатке на стане ХПТ-55 где: верхний график – данные с математического моделирования, нижний график – данные из прокатки на стане ХПТ-55; 0,367 и 0,3895 – исходные разнотолщинности заготовок;  $e$  – фундаментальная математическая константа, основа натуральных логарифмов; 0,012 и 0,015 – коэффициенты интенсивности изменения абсолютной поперечной разнотолщинности;  $x$  – суммарная относительная деформация по стенке трубы

Из графиков и формул, описывающих эти графики, видно, что они имеют схожую природу уменьшения разнотолщинности. Полученные отличия являются результатом введенных упрощений в модель, без которых процесс расчёта был бы громоздким и трудно реализуемым. При этом, отклонения не критично влияют на результаты.

Рассмотрим формулу, полученную при описании кривых. Эта формула описывает уменьшение абсолютной поперечной разнотолщинности и имеет вид:

$$\Delta S = \Delta S_{\text{исх}} e^{-\alpha \varepsilon_{\Sigma}} \quad (1)$$

где  $\Delta S_{\text{исх}}$  – исходная разнотолщинность заготовки;  $e$  – фундаментальная математическая константа, основа натуральных логарифмов;  $\alpha$  – коэффициент интенсивности изменения абсолютной поперечной разнотолщинности;  $\varepsilon_{\Sigma}$  – суммарная относительная деформация по стенке трубы.

В таком случае, суммарное уменьшение абсолютной разнотолщинности ( $\Delta S_{\text{сум}}$ ) заготовки при многопроходной прокатке в готовую трубу можно сделать по формуле:

$$\Delta S_{\text{сум}} = \Delta S_{\text{нач}} \cdot e^{-A\varepsilon_{\Sigma 1}} \cdot e^{-A\varepsilon_{\Sigma 2}} \cdot \dots \cdot e^{-A\varepsilon_{\Sigma n}} \quad (2)$$

где  $\Delta S_{\text{нач}}$  – исходная разностенность заготовки;  $e^{-A\varepsilon_{\Sigma 1}}$  – снижение разностенности при первой прокатке;  $e^{-A\varepsilon_{\Sigma 2}}$  – снижение разностенности при второй прокатке;  $e^{-A\varepsilon_{\Sigma n}}$  – снижение разностенности при n-ной прокатке.

На основе данной формулы была создана программа прогнозирования разностенности для маршрутов прокатки (прогноз разностенности – ХПТ, ХПТР). Это позволило получить удобный механизм для прогнозирования абсолютной поперечной разностенности при многопроходной прокатке труб на станах холодной прокатки для сплавов на основе титана. Использование такой программы позволит прогнозировать геометрические параметры труб после каждой прокатки в многопроходных маршрутах с учётом получаемых деформаций при каждом проходе и с учетом характеристик наклепа металла.

Чтобы подтвердить все наработки и оценить полученные зависимости по прогнозированию снижения абсолютной поперечной разностенности, был проведен сравнительный анализ многопроходной прокатки труб и аналитических данных, полученных из расчетной программы с применением математического моделирования.

Исходная разностенность трубы была измерена и составила 0,55 миллиметра. Далее труба была прокатана на трёх станах. Маршрут прокатки трубы был выбран для одного из ходовых размеров, а именно:

1. Заготовка 63x8,5 мм, перекал на стане ХПТ-75 на размер 38x4,5 мм.
2. Заготовка 38x4,5 мм, перекал на стане ХПТ-55 на размер 25,4x2,41 мм.
3. Заготовка 25,4x2,41 мм, перекал на стане ХПТ-32 на размер 19,8x1,65 мм.

При помощи программы было рассчитано падение разностенности при каждой прокатке и суммарное уменьшение разностенности при прокатке по вышеприведенному маршруту. В ходе расчёта были учтены исходная разностенность трубы и деформации, которые она получит.

Рассмотрим график (рис. 3) на котором приведено сравнение падения разностенности при прокатке и расчётное падение разностенности, полученное с использованием программы «Прогноз разностенности –ХПТ, ХПТР». На нём отображено отношение разностенности полученное после каждого стана к абсолютной разностенности трубы. Данные приведены как для исходной заготовки, так и для разностенности после каждой прокатки на станах ХПТ.

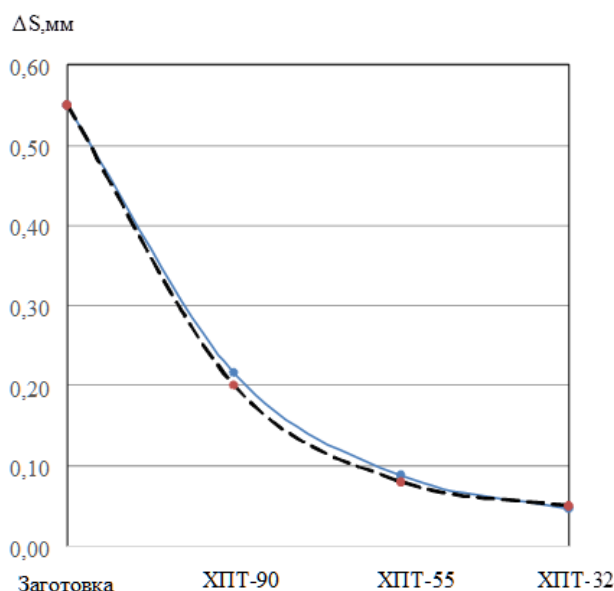


Рис. 3 Сравнительный график изменений эксцентричной разностенности при многопроходной прокатке на станах ХПТ и расчетных данных, где пунктирная линия – данные по изменению разностенности при многопроходной прокатке на станах ХПТ, сплошная линия – данные по изменению разностенности полученные при расчетах

На представленном графике маркерами обозначены данные, полученные в результате экспериментов и данные из расчетов. Из графика видно, что разница при сопоставлении расчётных данных и экспериментальных по изменению эксцентричной разностенности находится в пределах 0,01–0,02 миллиметра, что является весьма точным показателем для такого процесса.

### ВЫВОДЫ

На основе математического моделирования, лабораторного эксперимента и промышленных исследований были получены зависимости, описывающие уменьшение поперечной разностенности труб при холодной прокатке на оправке. Внедрение этих зависимостей позволило разработать метод прогнозирования изменения поперечной разностенности от трубы-заготовки до готовой трубы. Использование развитого метода прогнозирования поперечной разностенности при многопроходной прокатке труб из сплавов на основе титана позволяет создавать научно обоснованные маршруты и обеспечивать уменьшение расходов на производстве.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов Г.А. *Основы теории точности труб* / Г. А. Орлов. – Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2001. – 105 с.
2. Григоренко В.У. *Исследование снижения поперечной разностенности труб при редуцировании в условиях непрерывной периодической роликовой прокатки труб* / В.У. Григоренко, В.Н. Данченко, А.А. Миленин. – Днепропетровск: Системные технологии. – 2003 – № 6 (29). – С. 140–148.
3. Данченко В.Н. *Изменение эксцентричной составляющей разностенности труб при продольной прокатке на оправлении* / В. Н. Данченко, А.В. Чус / Книга «Продольная прокатка труб». – М. : «Металлургия», 1984. – С. 110–114.
4. Кузнецов Е.Д. *Развитие теории и практики производства прецизионных стальных труб* / Е.Д. Кузнецов // *Развитие теории процессов производства труб: Сб. науч. тр. под редакцией В.Н. Данченко.* – Днепропетровск : Системные технологии, 2005. – С. 233–259.
5. Мищенко А.В. *Экспериментальное исследование закономерностей снижения поперечной разностенности труб при холодной деформации на оправке* / А.В. Мищенко, В. У. Григоренко // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2013. – №4(37).

### REFERENCES

1. Orlov G.A. *Osnovy teorii tochnosti trub* / G. A. Orlov. – Ekaterinburg, UGTU-UPI, 2001. – 105 s.
2. Grigorenko V.U. *Issledovanie snizhenija poperechnoj raznostennosti trub pri reducirovanii v uslovijah bespreryvnoj periodicheskoj rolikovej prokatki trub* / V.U. Grigorenko, V.N. Danchenko, A.A. Milenin. – Dnepropetrovsk: *Sistemnye tehnologii.* – 2003 – № 6/ (29). – S. 140–148.
3. Danchenko V.N. *Izmenenie jekscentrichnoj sostavljajushhej raznostennosti trub pri prodol'noj pro-katke na opravlenii* / V. N. Danchenko, A.V. Chus / *Kniga «Prodol'naja prokatka trub».* – M. : «Metallurgija», 1984. – S. 110–114.
4. Kuznecov E.D. *Razvitie teorii i praktiki proizvodstva precizionnyh stal'nyh trub* / E.D. Kuznecov // *Razvitie teorii processov proizvodstva trub: Sb. nauch. tr. pod redakciej V.N. Danchenko.* – Dnepropetrovsk : *Sistemnye tehnologii,* 2005. – S. 233–259.
5. Mishhenko A.V. *Jeksperimental'noe issledovanie zakonornostej snizhenija poperechnoj raznostennosti trub pri holodnoj deformacii na opravke* / A.V. Mishhenko, V. U. Grigorenko // *Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnyh trudov.* – Kramatorsk : DGMA, 2013. – №4(37).

Мищенко А. В. – аспирант НМетАУ

Григоренко В. У. – д-р техн. наук, проф. каф. УП НМетАУ

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: mishchenkooleksii@gmail.com

Статья поступила в редакцию 18.03.2016 г.