

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ И ФИНИШНЫХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СВАРНЫХ И БЕСШОВНЫХ ТРУБ

А.В. Выдрин, П.А. Мальцев, Д.В. Луценко, А.Г. Моисеев, В.Н. Лозовой

Введение

Качество сварных и бесшовных труб формируется последовательно на протяжении всей технологической схемы производства, начиная от раскроя заготовки и кончая отделочными операциями. При этом наиболее существенное влияние на качество труб оказывает, во-первых, качество исходной заготовки и, во-вторых, заключительные операции пластической деформации и термической обработки. Если, в частности, рассматривать процесс производства сварных труб, то одним из доминирующих условий получения качественного сварного шва является качество кромок штрипса, которые, как правило, бывают резанными. Важными характеристиками качества бесшовных труб являются точность геометрических размеров и уровень механических свойств. Большой вклад в формирование точности геометрических размеров и механических свойств горячекатаных бесшовных труб вносит процесс редуцирования. Точность геометрических размеров холоднокатаных труб определяется условиями холодной прокатки. Для определения параметров процессов производства высококачественных труб целесообразно применять математическое, в том числе компьютерное, и физическое моделирование.

Математическая модель процесса резки штрипса

Правильная настройка ножей при продольной резке штрипса повышает резерв использования ножей, качество резаной кромки и, как следствие, сварных труб. Анализ особенностей процесса резки металлической полосы показал, что оптимальный зазор Δ между ножами при порезке той или иной марок стали зависит от пластических свойств металла штрипса. Это требует наличия расчетных методов, позволяющих учитывать связь величины необходимых зазоров Δ между дисковыми ножами с пластичностью металла для широкого марочного состава штрипсов.

При разработке методики аналитического определения величины зазора между ножами Δ , обеспечивающего высокое качество реза, условно примем расчетную схему с неподвижным нижним ножом (рис. 1).

При этом будем считать, что верхний нож перемещается в вертикальном направлении со скоростью V_H . Также будем считать, что все смещения частиц металла при резке сосредоточены в слое шириной Δ , а остальные части полосы представляют собой жесткие недеформируемые тела.

В этом случае часть металла, расположенная под верхним ножом, будет перемещаться вниз со скоростью V_H , часть металла, расположенная над нижним ножом, будет оставаться неподвижной, а в слое шириной Δ будет происходить изменение скорости смещения материальных частиц от V_H до нуля. Предположим, что это изменение происходит по линейному закону, т.е.

$$V_y = V_H x / \Delta.$$

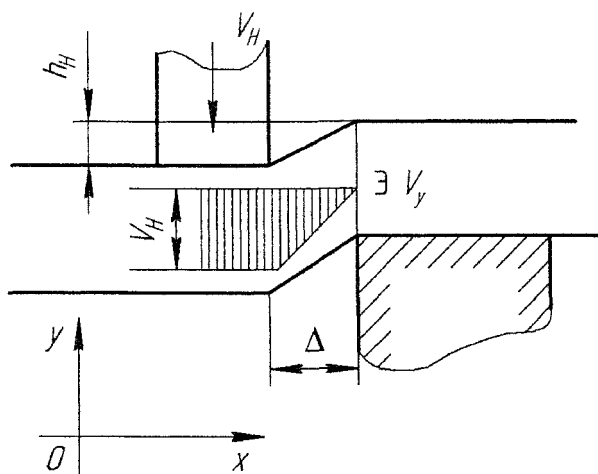


Рис. 1. Схема смещения частиц металла при выполнении реза полосы

Поскольку других изменений кинематического состояния полосы в рассматриваемом случае нет, тензор скоростей деформации ξ_{ij} будет содержать только две ненулевые компоненты:

$$\xi_{xy} = \xi_{yx} = \frac{1}{2} \frac{\partial v_y}{\partial x} = V_H / 2\Delta.$$

Интенсивность скоростей деформаций сдвига а этом случае будет равна

$$H = \sqrt{4\xi_{xy}^2} = 2\xi_{xy} = V_H / \Delta.$$

В соответствии с физическими уравнениями связи напряженного и деформированного состояния в слое шириной Δ будут возникать касательные напряжения

$$\sigma_{xy} = 2T\xi_{xy} / H = T,$$

где T – интенсивность касательных напряжений.

Поскольку металл находится в пластическом состоянии, согласно условию пластичности $T = \tau_s$, т.е. $\sigma_{xy} = \tau_s$, что говорит о том, что в слое толщиной Δ происходит чистый сдвиг.

Для того чтобы определить величину перемещения ножа, при котором начнется хрупкое разрушение металла, воспользуемся феноменологической теорией разрушения Колмогорова-Богатова [1], согласно которой лавинообразный рост трещин начинается при достижении величины использования ресурса пластичности ψ , значения равного единице ($\psi = 1$). В общем случае величина ψ , как известно, вычисляется по формуле

$$\psi = \int_0^{t_p} \frac{H d\tau}{\Lambda_p},$$

где t_p – время до разрушения; Λ_p – пластичность металла; τ – текущее время.

Для выбранной расчетной схемы текущее время можно представить в виде

$$\tau = h_n / V_n,$$

где h_n – величина перемещения верхнего ножа.

При постоянной скорости перемещения ножа

$$d\tau = \frac{dh_n}{V_n}.$$

В этом случае степень использования ресурса пластичности будет равна

$$\psi = \int_0^{h_n^p} \frac{dh_n}{\Lambda_p \Delta} = \frac{h_n^p}{\Lambda_p \Delta},$$

где Λ_p – пластичность металла, определенная для условий чистого сдвига, например, в опытах на кручение; h_n^p – величина перемещения ножа, при котором начнется хрупкое разрушение.

В соответствии с критерием разрушения Колмогорова-Богатова

$$\frac{h_n^p}{\Lambda_p \Delta} = 1$$

или

$$h_n^p = \Lambda_p \Delta$$

Известно, что согласно теории Гриффитса механизм разрушения металлов – это механизм отрыва, который происходит под действием растягивающих напряжений. При этом плоскость отрыва всегда перпендикулярна направлению максимального растягивающего напряжения.

Известно также, что на площадках, перпендикулярных главным направлениям, действуют максимальные касательные напряжения. С другой стороны, известно, что площадки главных нормальных напряжений расположены под углом $\pi/4$ к площадкам максимальных касательных напряжений. Следовательно, поверхность разрушения металла в процессе реза будет располагаться под углом $\pi/4$ к осям OX и OY (см. рис. 1). Для того чтобы осуществить качественный рез без заусенцев и рванин, необходимо, чтобы поверхности разрушения со стороны верхнего и нижнего ножей лежали в одной плоскости (рис. 2).

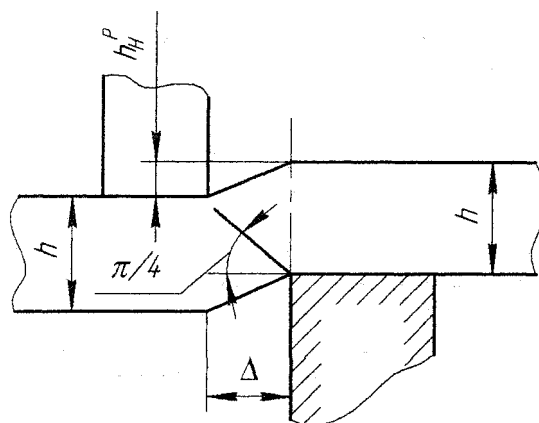


Рис. 2. Геометрия разрушения металла при потере резерва пластичности

Из простых геометрических построений можно получить, что это обеспечивается при условии

$$h - h_n^p = \Delta,$$

где h – толщина разрезаемой полосы.

С учетом ранее полученных результатов можно записать

$$h = \Delta(1 + \Lambda_p)$$

или

$$\Delta = \frac{h}{1 + \Lambda_p}.$$

Полученная формула для определения оптимальных условий продольного роспуска проката и получения качественного штрипса значительно облегчают и расширяют возможности экспериментальных разработок рекомендаций по технологии повышения качества штрипса и, как следствие, сварных труб. В то же время следует иметь в виду, что расчет величины зазора между ножами имеет оценочный характер, т.к. формула получена с введением ряда допущений и не учитывает возможного износа ножей.

Компьютерное моделирование процесса холодной прокатки труб

Качество труб, прокатанных на станках ХПТ, с точки зрения точности их геометрических размеров и отсутствия нарушений сплошности металла во многом определяется калибровкой прокатного инструмента. Существующие методы расчета параметров калибровки валков и оправок достаточно трудоемки и не всегда поддаются алгоритмизации. В связи с этим разработан программный продукт, позволяющий автоматизировать процесс расчета калибровок технологического инструмента станков ХПТ с подковообразными и кольцевыми калибрами, а также станков ХПТР. Разработанный алгоритм предусматривает возможность расчета калибровок по методикам МИСиС, НИТИ-НТЗ, УралНИТИ [2]. Известные методики в процессе алгоритмизации были дополнены численными методами решения трансцендентных уравнений, оптимизацией профиля калибра при использова-

нии методики УралНИТИ, а также уточненной методикой определения поврежденности металла. Разработанный программный продукт снабжен базами данных, содержащими технические характеристики станов ХПТ и ХПТР, информацию по механическим свойствам сталей и сплавов, информацию по принятым ГОСТам и стандартам, а также значения ряда условно постоянных величин, которые используются при проведении расчетов. Помимо расчета калибровки, в программе предусмотрена возможность определения размеров копиров для изготовления инструмента на станках различной конфигурации.

С использованием разработанного программного продукта были спроектированы калибровки валков станов ХПТ-32, ХПТ-55 и ХПТ-75 Синарского трубного завода. Трубы, прокатанные в этих валках получились соответствующими предъявляемым требованиям (рис. 3).

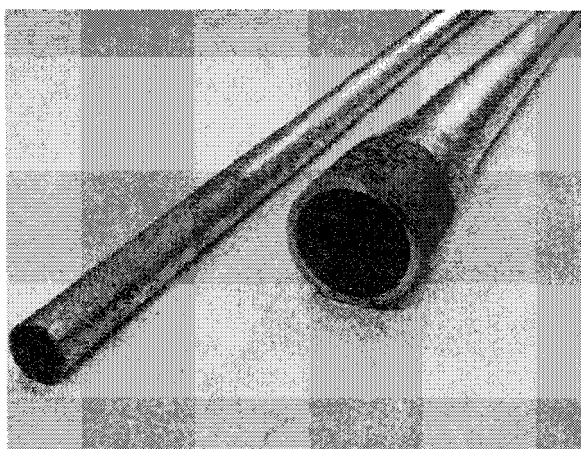


Рис. 3. Конус деформации на трубе, прокатанной по рассчитанной калибровке

Созданный программный продукт, наряду с автоматизированным проектированием калибровок технологического инструмента станов ХПТ и

ХПТР, позволяет также анализировать закономерности, характерные для холодной прокатки труб на предпроектной и проектной стадиях. Это позволяет без существенных материальных и временных затрат заранее выбирать стратегию и конкретные технологические параметры при производстве холоднодеформированных труб различных типоразмеров из разных металлов и сплавов. В качестве примера, на рис. 4 приведены результаты исследования влияния формы калибра на среднее контактное давление.

В табл. 1 показано влияние схемы калибровки валков на поврежденность металла труб из разных марок сталей. Расчеты выполнены применительно к стану ХПТ-32 при прокатке трубы диаметром 22 мм с толщиной стенки 1 мм из заготовки диаметром 32 мм с толщиной стенки 2,7 мм.

Таблица 1
Значения показателя поврежденности металла труб из различных сталей

Методика расчета калибровки	Марка стали			
	10	45	12Х1МФ	ШХ-15
МИСиС	0,762	1,239	0,516	1,272
НИТИ-НТЗ	0,765	1,242	0,517	1,276
УралНИТИ	0,75	1,216	0,504	1,238

Моделирование процесса редуцирования труб

В настоящее время процесс редуцирования труб достаточно хорошо изучен [3], что позволяет с определенной степенью точности анализировать этот процесс и определять его технологические параметры. Тем не менее, большинство методик требует дальнейшего развития и уточнения с целью их практического использования с применением современной компьютерной техники.

В связи с этим был выполнен комплекс работ по созданию и использованию математических моделей процесса редуцирования труб и компью-

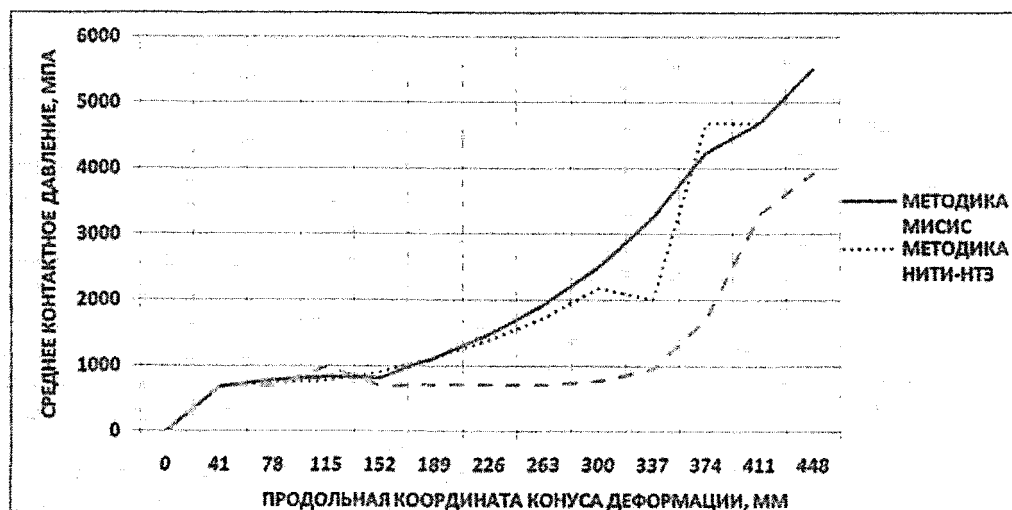


Рис. 4. Влияние способа калибровки валков на распределение среднего контактного давления по длине конуса деформации

терных программ, позволяющий анализировать процесс редуцирования как с межклетевым натяжением труб, так и без него, для углеродистых и легированных марок стали. При этом имеется возможность проводить исследования технологических режимов для редуциционных станов, оснащенных как двух-, так и трехвалковыми клетями. Модель процесса редуцирования разрабатывалась по иерархическому принципу и состоит из нескольких модулей.

Модуль расчета скоростного режима, энергосиловых параметров и калибровки валков редуциционного стана представляет собой компьютерную программу, разработанную в интегрированной среде Borland Delphi. Возможности этой программы и ее использование для анализа скоростных режимов редуциционного стана представлены в работе [4]. В настоящее время продолжается теоретическое исследование на основе моделирования процесса редуцирования труб с использованием этого модуля. В качестве примера на рис. 5 представлены закономерности, описывающие влияние толщины стенки трубы на энергосиловые параметры процесса.

Из представленных графиков видно, что увеличение толщины стенки трубы ведет к росту усилия редуцирования, причем при достижении некоторого значения толщины стенки (на рис. 5 а - 16 мм при диаметре трубы 89 мм) происходит скачкообразное увеличение усилия редуцирования. Реально это обстоятельство приводило к выходу наружного диаметра при редуцировании толстостенных труб за плюсовую границу поля допуска. Компьютерное моделирование позволило скорректировать калибровку валков и обеспечить требуемую точность геометрических размеров. Величина крутящего момента также увеличивается с увеличением толщины стенки, однако при этом, как видно из рис. 5 б, первые и последние клетки оказываются недогруженными. Последнее свидетельствует о

возможности применения неприводных клетей в составе редуциционного стана.

Одним из важнейших вопросов технологии редуцирования является распределение обжатий по клетям, которое необходимо знать для составления таблиц прокатки и определения других технологических параметров. При этом необходимо системное исследование процесса с учетом объективно имеющейся системы ограничений. Для решения этого вопроса разработан модуль расчета режима обжатий, энергосиловых параметров, калибровки валков и настройки редуциционного стана. Модуль реализован в виде компьютерной программы, разработанной в интегрированной среде Borland Delphi. При расчете режима обжатий в качестве базового принимается равномерное распределение обжатий и натяжений трубы в средних клетях стана при обработке тонкостенных труб и падающий режим обжатий при обработке толстостенных труб. Натяжение в головной и калибрующей группах клетей рассчитываются, исходя из тянущей способности валков. Обжатия в головной группе клетей определяются с учетом условий захвата, а в калибрующей - с учетом получения точных значений наружного диаметра.

Разработанная программа использована на Волжском трубном заводе для определения условий физического моделирования процесса редуцирования труб из нержавеющей марки стали. Одним из требований, предъявляемых к таким трубам является уровень механических свойств. Физическое моделирование ставило своей целью определение возможностей процесса редуцирования по управлению структурой и свойствами металла. В результате проведенных исследований выявлено, в частности, что на уровень механических свойств существенно влияет температуру редуцирования и для получения товарных труб с высокой группой прочности целесообразно снижать температуру редуцирования (табл. 2).

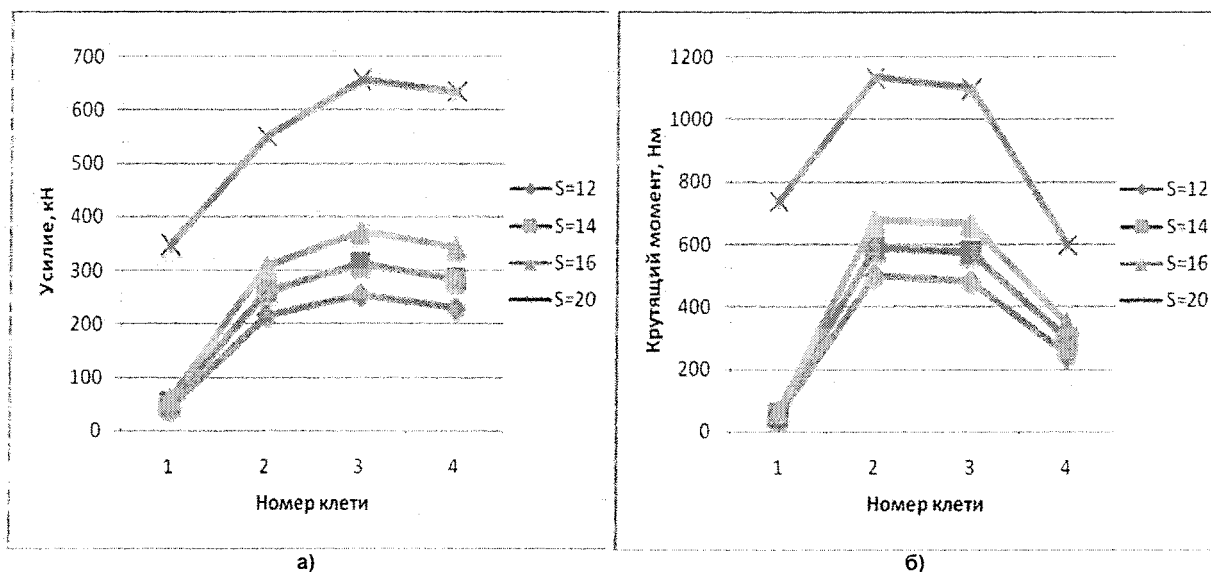


Рис. 5. Влияние толщины стенки трубы на усилие (а) и момент (б) редуцирования

Механические свойства труб после редуцирования

Температура редуцирования, °С	Механические свойства				Микроструктура, балл
	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	σ_T при +350 °С, МПа	
760–810	580	255–295	45	199–245	5–6
810–840	547–570	230–282	46–55	172–233	5–7
По ТУ 14-3Р-197	Не менее 549	–	Не менее 37	186-333	Не крупнее 4

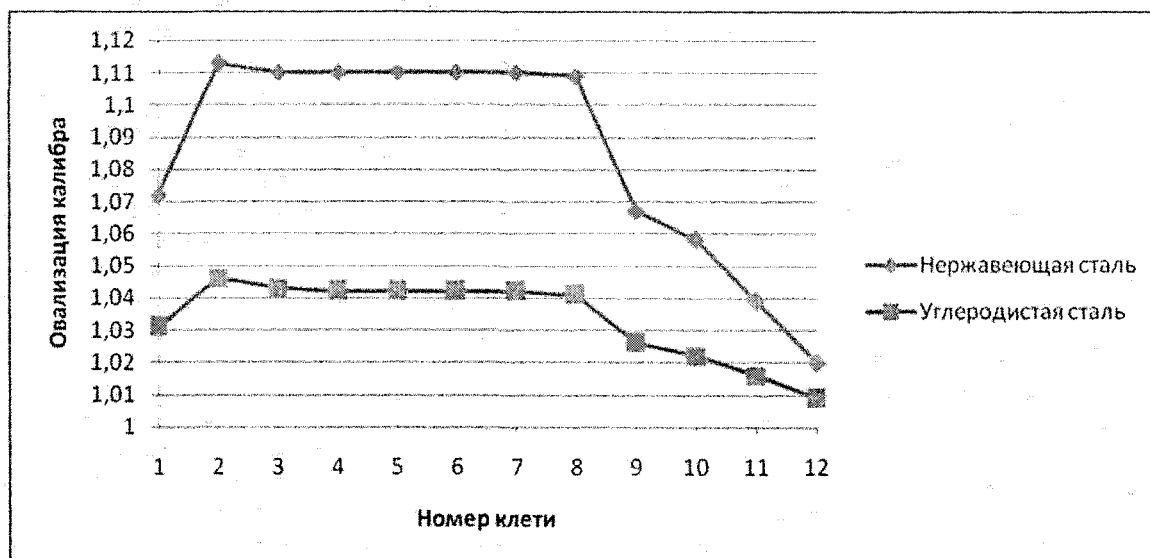


Рис. 6. Овальзация калибра при редуцировании труб 102x10 из нержавеющей и углеродистой стали

Особенностью процесса редуцирования труб из коррозионно-стойких марок стали является высокий коэффициент контактного трения. Поскольку трение оказывает существенное влияние на уширение металла, с помощью компьютерной модели выполнен сравнительный анализ калибровок валков для случаев редуцирования труб из углеродистых и коррозионно-стойких марок сталей. Результаты моделирования представлены в виде графиков на рис. 6.

Как видно из рис. 6, овальзация калибров при редуцировании труб из нержавеющей сталей должна быть существенно выше, чем при редуцировании труб из углеродистых марок сталей. Это говорит о том, что для получения труб с высокой точностью геометрических размеров нельзя использовать одни и те же валки при редуцировании труб из углеродистой и коррозионно-стойкой марок сталей одного и того же типоразмера.

Выводы

1. Для получения качественного сварного шва при производстве труб необходимо обеспечить высокое качество продольного реза кромок. Феноменологическая теория разрушения металлов при обработке давлением позволяет связать пластичность металла с величиной зазора между но-

жами, обеспечивающей отсутствие заусенцев и рванин в плоскости реза.

2. Точность геометрических размеров и целостность металла труб при холодной прокатке зависит от калибровки валков. Созданная система автоматизированного проектирования калибровки технологического инструмента станов ХПТ и ХПТР позволяет анализировать влияние формы инструмента, определенной на основе различных подходов, на параметры холоднодеформированных труб и, тем самым, выбирать наиболее рациональный вариант для каждого конкретного случая.

3. Усилие редуцирования труб возрастает с увеличением толстостенности, причем чем больше толстостенность, тем это возрастание протекает более интенсивно. В связи с этим для компенсации возрастающих упругих деформаций механического оборудования стана, и тем самым повышения точности труб, при увеличении их толстостенности следует уменьшать диаметр калибров валков редуцирующего стана, однако учитывая при этом, что увеличение толстостенности увеличивает усадку профиля при его остывании.

4. При редуцировании труб из коррозионно-стойких марок стали для повышения группы прочности следует уменьшать температуру редуцирования. Калибры валков при редуцировании

коррозионно-стойких марок стали должны иметь большую овализацию по сравнению с калибрами для редуцирования углеродистых марок сталей.

Литература

1 Богатое, А.А. *Механические свойства и модели разрушения металлов* / А.А. Богатое. - Екатеринбург: ГОУ ВЛО УГТУ-УЛЛ, 2002. - 329 с.

2. Богатое, А.А. *Расчет маршрутов изготовления холоднодеформированных труб* / А.А. Бога-

тое, О.И. Мижирский, А.В. Тропотов. - Свердловск: УЛИ, 1989. - 116 с.

3. *Технология непрерывной безправочной прокатки труб* / Г.И. Гуляев, П.Л. Лвшин, Л.Л. Ерохин и др. - М.: Металлургия, 1975. - 264 с.

4. Багаев, Н.Ф. *Рационализация скоростных режимов редуцирующего стана с помощью компьютерного моделирования* / Л.Ф. Багаев, А.В. Выдрин, А. О Малкова // Труды XIII Международной научно-практической конференции «ТРУБЫ-2005». - Челябинск: ОАО «РосЛИТЛ». - 2005. - Т 2. - С. 41-42.