

Развитие идеологии построения калибровок инструмента для холодной прокатки труб из сплавов на основе титана

Статья посвящена освещению вопросов калибровки и стойкости деформирующего инструмента станов холодной прокатки труб (ХПТ) при производстве труб из титановых сплавов. Проанализировано состояние и тенденции методов построения калибровок для холодной прокатки труб из сплавов на основе титана. Рассмотрены основные типы калибровок, их преимущества и недостатки, а также задачи, которые ставятся перед современными калибровками. Отмечены выводы и рекомендации, имеющие прямое отношение к улучшению качества холоднокатаных труб именно из титановых сплавов путем повышения точности их размеров. Рассмотрены данные о влиянии величины развалки на точность прокатываемых труб на станах ХПТ. В ходе анализа было проведено сравнение калибровок, основанное на геометрии поперечного сечения эллипса и овала Кассини. Выделенные преимущества овала Кассини позволяют улучшить точность поперечного сечения прокатываемых труб и предоставить широкие возможности по распределению обжатий при проектировании калибровок. Это позволяет рекомендовать овал Кассини к использованию в качестве профиля поперечного сечения калибров. Рассмотрена актуальность замкнутых решений при качественном анализе влияния планируемых технологических режимов процесса холодной прокатки труб на выбор ширины ручья калибров. Выполнены исследования зависимости объемов прокатанных труб из титановых сплавов от износостойкости калибров станов ХПТ. Определены зависимости износостойкости калибров от объемов прокатанных труб из титановых сплавов, что продемонстрировало наглядное влияние химического состава материала калибров на их износостойкость в ходе работы. Полученные в ходе исследования результаты позволили сделать ряд важных выводов по возможности развития методик построения калибровок рабочего инструмента станов ХПТ и предложить рекомендации по повышению износостойкости калибров при холодной прокатке труб из сплавов на основе титана.

Ключевые слова: трубы, титан, сплавы, холодная прокатка труб, калибровка прокатного инструмента, овал Кассини, износостойкость калибров.

Калибровка рабочего инструмента станов холодной пильгерной прокатки труб (ХПТ) является основополагающим элементом технологии производства высокоточных труб из титановых сплавов. При этом под калибровкой инструмента станов ХПТ обычно понимают определение размеров и формы ручьев калибров и оправок, их профилирование. Задание калибровки состоит в обеспечении заданного распределения обжатия металла по длине рабочего конуса прокатываемой трубы в очаге деформации. При этом необходимо определить, во-первых, профиль ручья калибров, который может быть выполнен в виде постоянной или переменной конусности при линейно-конусном или криволинейном профиле оправки, во-вторых, выбрать параметры изменения профиля ручья калибров в поперечных сечениях по всей длине очага деформации от заготовки до прокатанной трубы вдоль конуса деформации. Этими параметрами являются форма ручья по гребню ка-

либра (в виде дуги окружности, эллипса и др.), величина развалки ручья, угол выпуска, форма кривой выпуска, степень тесноты ручья и др. Каждый из этих параметров в отдельности, а также в сочетании с действием других параметров, существенно влияет на качество прокатываемых труб. Особую роль они играют при производстве холоднокатаных труб из специальных труднодеформируемых сталей и сплавов, в частности сплавов на основе титана.

Вопросам калибровки рабочего инструмента станов ХПТ посвящены десятки, а может быть и сотни исследований, выполненных на разных этапах развития теории и технологии пильгерной прокатки труб [1–5 и др.]. Детально проанализировать результаты, выводы и рекомендации всех работ не представляется возможным из-за ограничений по объему текста данной статьи. Поэтому отметим лишь выводы и рекомендации, не вызывающие возражений с теоретической точки зрения, подтвержденные

производственной практикой и имеющие прямое отношение к улучшению качества холоднокатаных труб именно из титановых сплавов путем повышения точности их размеров [6].

В получившей широкое распространение и признании книге [2] рассмотрены различные подходы к выбору профиля ручья вдоль оси холодной прокатки труб на станах ХПТ при использовании конусных оправок. Калибровка ручья по методу Я.Е. Осады строится исходя из условия соблюдения изначально заданного изменения относительных деформаций по длине рабочего конуса. В основу графо-аналитического метода расчета калибровки ручья, предложенного в развитие подхода Я.Е. Осады, положено условие соблюдения падающего режима относительных деформаций по толщине стенки трубы вдоль рабочего конуса. Методика П.К. Тетерина расчета калибровки гребня ручья основана на принципе уменьшения абсолютных обжатий по длине очага деформации (хода клетки). В основу метода профилирования ручья калибров, разработанного Ю.Ф. Шевакиным, так же, как и в методе Я.Е. Осады, положен принцип изменения относительных деформаций по длине ручья, но уточняется зависимость (линейная или логарифмическая) изменения деформаций. В методе Первоуральского Новотрубного завода (НТЗ) относительная деформация уменьшается по мере увеличения упрочнения металла в процессе прокатки.

Метод НТЗ профилирования гребня ручья калибров стана ХПТ рационально дополнить более строгой по сравнению с приведенной в [2] зависимостью предела текучести металла от степени деформации и учетом изменения его температуры при прокатке труднодеформируемых сталей и сплавов, что весьма важно при определении технологии производства труб из сплавов на основе титана. Учитывая нынешние возможности компьютерной техники, увеличение громоздкости уравнений, используемых в связи с включением в расчет температурных эффектов, не создает непреодолимых трудностей решения. Отметим, что методика НТЗ была одной из первых, в которой предпринята попытка непосредственно в расчетах профиля ручья калибров учесть изменения сопротивления деформации металла при прокатке труб на станах ХПТ.

Для условий теплой (при температурах 150–300 °С) прокатки труб с увеличенными обжатиями за проход была разработана калибровка КТП (калибровка для теплой прокатки), предусматривающая увеличение конусности профиля ручья в зоне редуцирования и смещение обжатий к началу обжимной зоны [4, с. 123].

В монографии [4, с. 115–157] названные выше методики отнесены к калибровкам первого и второго поколения. Их недостаток состоит, прежде всего, в использовании при определении профиля гребня ручья эмпирических коэффициентов, которые в большинстве случаев применимы лишь к некоторым конкретным условиям производства холоднокатаных труб. А главное различие состоит в том, какому принципу удовлетворяет убывание относительных де-

формаций по длине обжимной зоны – в соответствии со снижением пластичности прокатываемого металла или исходя из условия обеспечения постоянства силы прокатки. Убывание относительных деформаций по длине очага деформации может выбираться также исходя из какого-либо другого рационального подхода. При анализе этих методов калибровки складывается впечатление, что применяя различные кривые, согласно которым изменяется профиль ручья калибров, авторы стремились обеспечить постоянство силы прокатки по ходу клетки стана ХПТ и тем самым исключить влияние непостоянства упругих деформаций клетки и валкового узла на точность прокатываемых труб.

Калибровки третьего поколения предусматривают криволинейную форму развертки гребня ручья и криволинейную форму образующей оправки. К третьему поколению отнесены [4, с. 138] калибровки КПО (калибровка пропорциональных обжатий) и калибровка фирмы Mannesmann-Meer. Согласно данным, приведенным в книге [4], эти калибровки способствуют будто бы меньшему упрочнению (наклепу) металла по длине рабочего конуса и, следовательно, позволяют увеличить степень деформации за проход, например, при прокатке труб из стали ШХ-15 до 75 % и даже более.

Отмеченное в экспериментах влияние характера распределения обжатий по диаметру и толщине стенки трубы в очаге деформации при прокатке на упрочнение (наклеп) деформированного металла пока не получило однозначной трактовки, объяснения. Видимо, наблюдаемый эффект [4, с. 141–143] обусловлен различной степенью проработки структуры прокатываемого металла при одинаковой относительной степени деформации (вытяжке), но различном соотношении величин обжатия трубы по диаметру и толщине стенки, которое определяется в том числе и профилем ручья калибров стана ХПТ. Можно ожидать, что эта тема послужит предметом более глубокого материаловедческого исследования.

Применительно к прокатке труб из сплавов на основе титана можно сделать следующее заключение в отношении методов профилирования калибров и оправок станов ХПТ. Известные методы определения профиля гребня ручья калибров базируются на сформулированных П.Т. Емельяненко научных положениях проектирования ручья калибров при пильгерной прокатке труб на станах ХПТ. Авторы всех известных методов расчета ширины калибров станов ХПТ исходят из выдвинутого П.Т. Емельяненко постулата, что ширина ручья калибра должна быть равной диаметру ручья в сечении, отстоящем от рассматриваемого сечения на расстоянии, соответствующего объему подачи металла перед рабочим ходом клетки. Разумеется, что речь идет о подаче перед прямым ходом клетки. Частные решения, предложенные названными выше и многими другими учеными, представляют различные варианты подхода П.Т. Емельяненко с использованием разных кривых, описывающих распределение обжатий по длине рабочего конуса, введением приемлемых допущений,

упрощений и поправочных коэффициентов, установленных экспериментально. При этом авторы предлагаемых методик профилирования калибров станов ХПТ ставили, как правило, разные цели.

Например, стремились достичь соответствия профиля калибров изменению свойств деформируемого металла, обеспечить условие постоянства силы прокатки, повысить производительность процесса прокатки за счет увеличения степени деформации трубы (заготовки) за проход, улучшить точность прокатываемых труб и др. Большинство из названных методов калибровки имеют право на жизнь. Нет причин отдавать предпочтение на все возможные случаи какому-то одному методу калибровки, несмотря на его достоинства или недостатки. Ведь выбор метода расчета калибровок для использования в промышленности на конкретном заводе зависит от производственных условий (сортамента и требований к продукции, набора станов ХПТ разных типоразмеров и конструкций, многих других факторов).

Многие разработчики методов построения калибровок для прокатки труб на станах ХПТ понимают и понимают, что положенный в основу профилирования калибров метод П.Т. Емельяненко при всех его несомненных достоинствах не учитывает свойства прокатываемого металла. При использовании этого метода получается, что параметры профилей калибров и оправок являются одинаковыми для прокатки труб из труднодеформируемых сплавов и, скажем, из свинца. Дело даже не в том, что сила прокатки труб из стали и свинца будет различной и, соответственно, не одинаковыми будут упругие деформации рабочего инструмента и прокатной клетки. Главное – это необходимо помнить и учитывать, что пластическое течение в продольном и поперечном направлениях при деформировании разных, а иногда даже одних и тех же металлов, но с отличающейся структурой (размеров и формой зерен, частиц второй фазы, кристаллографической текстурой и т. д.), часто неодинаково.

Причина такого явления состоит в так называемой «нормальной пластической анизотропии» металлов [7, с. 83].

Коэффициент нормальной пластической анизотропии, как известно, характеризует различие в свойствах металла, измеренных в нормальном и параллельном плоскости образца направлениях. Он определяется отношением деформаций по ширине и толщине образца при его растяжении. Образцы, вырезанные из одной и той же стали, при растяжении могут удлиняться за счет утонения или путем уменьшения их ширины в зависимости от структуры. Классическим примером здесь является процесс глубокой вытяжки деталей из тонколистовой стали 08Ю. В зависимости от формы зерен феррита и кристаллографической текстуры стали во время штамповки из нее, например, цилиндрических колпачков при испытаниях по методу Свифта, металл может деформироваться по-разному – с образованием фестонов или без них. Аналогично при холодной пильгерной прокатке труб из титановых α и β сплавов, имеющих

разную структуру и свойства, пластическое течение металла может быть различным в продольном и поперечном направлениях. Этот аспект требует детального исследования не только применительно к производству холоднокатаных труб из сплавов на основе титана, а и для развития теории пильгерной прокатки в целом.

При производстве высокоточных труб не менее важной и сложной задачей является определение формы поперечного профиля ручья калибров. В работе [4, с. 150, 157] справедливо отмечено, что методика расчета развала калибров является предметом «know-how» разработчиков калибровок. Особое значение ширина калибров станов ХПТ приобретает при производстве холоднокатаных труб с высокими требованиями к точности размеров диаметра и толщины стенки [8–9], в частности, труб из сплавов на основе титана [6]. Ширина ручья калибров при прокатке определяет возможность течения деформируемого металла в продольном и окружном направлениях и поэтому влияет на точность прокатываемых труб. В монографиях [1–5] и многих других публикациях отмечается, что недостаточная ширина ручья калибров может приводить к дефектам «закат» и «закусывание» металла прокатываемых труб. С другой стороны, чрезмерная ширина ручья калибров увеличивает их разностенность, а также может вызывать трещинообразование и ухудшение микрорельефа поверхности труб, особенно из малопластичных сталей и сплавов. Для предупреждения названных дефектов необходимо при прокатке уменьшать величину подачи, что соответственно снижает производительность станов, повышает себестоимость труб. Отмеченные аспекты выбора оптимальной ширины ручья калибров известны. Но они представляют «вершину айсберга» в рассматриваемой теме, которая гораздо сложнее связана с технологией холодной прокатки труб.

Следует согласиться с мнением авторов работ [4–5, 10–13 и др.], что известные формулы для расчета ширины калибров станов ХПТ не всегда отвечает современным требованиям производственного процесса. Развитие машиностроения, авиастроения, судостроения и других отраслей промышленности потребовало разработки и освоения новых сталей и сплавов специального назначения, в том числе, новых сплавов на основе титана, производство холоднокатаных труб из которых заметно усложнилось. Кроме того, в связи с усовершенствованием конструкции станов и вспомогательного оборудования базовая технология холодной прокатки труб заметно продвинулась вперед по сравнению со временем, когда классические решения [1–3 и др.] были предложены. Многие известные формулы для расчета ширины и формы калибров станов ХПТ получены при принятии ряда упрощений и допущений, погрешность от внесения которых не оценена. Сказанное в полной мере касается и предложенных эмпирических коэффициентов, введенных для приближения полученных решений к реальным условиям производства. Ныне повсеместная компьютеризация расчетов исключила

необходимость существенного упрощения решений из-за громоздкости исходных аналитических выражений. Однако замкнутые решения и конечные формулы не потеряли своей актуальности при качественном анализе влияния планируемых технологических режимов процесса холодной прокатки труб на выбор ширины ручья калибров станов ХПТ.

Формула Я.Е. Осады, построенная на базе предложенного П.Т. Емельяненко принципа, имеет вид [1, с. 274]:

$$B = D + 2 \cdot \frac{\sqrt{t_x + 2V_y(tg\gamma_x - tg\alpha_x)} - t_x}{tg\gamma_x - tg\alpha_x} \cdot tg\gamma_x, \quad (1)$$

где B_x, D_x, t_x – ширина калибра, диаметр и толщина стенки трубы в контрольном сечении; V_y – объем подачи; α_x, γ_x – углы конусности ручья калибра и оправки. Индекс «x» обозначает координату рассматриваемого сечения рабочего конуса.

Удельный объем подачи V_y определяется [5, с. 206] формулой:

$$V_y = \frac{R_3 + r_3}{R_x + r_x} \cdot m t_3,$$

где R_3 и r_3 – наружный и внутренний радиусы заготовки; R_x и r_x – соответственно те же радиусы рабочего конуса в рассматриваемом сечении; t_3 – толщина стенки заготовки; m – величина подачи.

В условиях, когда величина $tg\alpha$ близка к нулю ($tg\alpha \rightarrow 0$) или когда $tg\gamma \approx tg\alpha$, что наблюдается на предкалибровочном или калибровочном участках рабочего конуса при применении оправок с криволинейной образующей, формула (1) упрощается и принимает удобный для анализа вид [10]:

$$B_x = D_x + 2m \frac{R_3 + r_3}{R_x + r_x} \cdot \frac{t_3}{t_x} \cdot tg\gamma_x. \quad (2)$$

Заметим, что по структуре формула (2) подобна формуле (65), приведенной в книге [2, с. 211]. Выражение

$$\frac{R_3 + r_3}{R_x + r_x} \cdot \frac{t_3}{t_x} = \mu_x$$

представляет собой коэффициент вытяжки в сечении x , равный отношению площади поперечного сечения исходной заготовки к площади поперечного сечения рабочего конуса прокатываемой трубы в сечении x .

Выражение (2) легко преобразуется в зависимость

$\frac{B_x}{D_x}$ от размеров заготовки, а также от радиуса R_x и толщины стенки t_x прокатываемой трубы в сечении x и угла конусности ручья калибров в этом сечении:

$$\frac{B_x}{D_x} = 1 + m \cdot \frac{2R_3 t_3 - t_3^2}{2R_x^2 t_x - R_x t_x^2} \cdot tg\gamma_x. \quad (3)$$

Анализ формул (2) и (3) приводит к бесспорному заключению, что относительная величина развала калибров должна возрастать прямо пропорционально величине подачи, которую планируют применять

при прокатке $\frac{B_x}{D_x}$ труб, и тангенсу угла конусности образующей ручья калибров $tg\gamma$.

Кроме того, в работе [9] отмечено, что поскольку произведение $(R_3 + r_3)t_3$ для конкретного сортамента труб есть величина постоянная, то при неизменности других условий отношение находится в обратной зависимости от R_x и t_x . Это значит, что чем больше R_x и t_x отличаются от R_3 и $\frac{B_x}{D_x} t_3$, тем относительная величина

развала калибров в сечении x должна быть большей. То есть, чем большее обжатие будет получать заготовка по диаметру и толщине стенки, тем развал калибров на соответствующих участках рабочего конуса должен быть большим, независимо от конусности ручья калибров и планируемой подачи при прокатке.

Вполне логичным является вывод, что величина обжатия трубы по диаметру влияет сильнее.

Касательно количественных рекомендаций, то согласно [1, с. 276, 279], выбирать ширину ручья калибров следует исходя из условий деформации прокатываемой трубы в зоне ее редуцирования. При этом в сечении, соответствующем началу ручья, ширину калибра рекомендуется устанавливать в 1,015 раза большей диаметра трубной заготовки. В монографиях [2, с. 210–212] и [4, с. 164–166] приводятся более сложные математические выражения для определения формы и размеров поперечного сечения ручья калибров, учитывающие, в частности, величину упругой деформации системы «клеть-валки» и износ ручья по его ширине и глубине. Предлагаются эмпирические коэффициенты, уточняющие расчеты ширины ручья по длине рабочего конуса прокатываемой трубы. Однако предполагаемые коэффициенты для учета вынужденного уширения деформируемого металла и износа калибров имеют настолько большой диапазон величин (от 1,80 до 1,05), что целесообразность их применения вызывает сомнение. Авторы [4] считают, что известные формулы не дают приемлемые для практического использования значения ширины ручья калибров. Именно поэтому производители холоднокатаных труб из сплавов на основе титана свои разработки в этой теме не раскрывают.

Эффективность поперечного профиля калибров станов ХПТ с позиций уменьшения разностенности прокатываемых труб зависит не только от правильно выбранной ширины ручья, но также и от его формы в поперечном сечении. При этом основными параметрами ручья калибра, характеризующими его форму, являются профиль по гребню ручья, чаще всего в виде дуги эллипса или образованный одной, двумя дугами окружностей [4–5, 11 и др.], угол выпуска и линия выпуска (круглая или «по прямой»). Согласно данным работы [1, с. 278], угол выпуска ручья калибров обычно составляет 15–20°. Достаточно подроб-

но применяемые на практике формы ручья калибров станок ХПТ рассмотрены в работах [4, с. 165–170; 5, с. 64–70; 11 и др.]. В монографии [4] подчеркивается, что в недалеком прошлом большинство трубных заводов имели в своем составе шлифовальные станки, позволявшие выполнять ручей калибров только эллипсоидной формы с выпусками по радиусу. В настоящее время предприятия уже оснащены станками с числовым программным управлением (ЧПУ), обеспечивающими воспроизводство расчетного профиля ручья калибров любой формы с точностью до $\pm 0,02$ мм. В этой связи весьма перспективным представляется выполнение ручья калибров с овальным профилем заданной формы в поперечном сечении.

С точки зрения обеспечения высокой точности прокатываемых труб, особенно из сплавов на основе титана, склонных к трещинообразованию при прокатке, эллипсную форму ручья калибров нельзя признать оптимальной. Вследствие эллипсности ручья калибров при многократном повороте прокатываемых на станах труб происходит многократный изгиб-разгиб трубы в очаге деформации. Из-за такого чередования сжимающих и растягивающих деформаций приповерхностные слои прокатываемого металла претерпевают дополнительное упрочнение. Пластичность его исчерпывается, в результате чего могут возникать микротрещины на внутренней поверхности труб. Правильно выбранная овальная форма ручья калибров должна существенно уменьшить знакопеременный изгиб прокатываемой трубы в очаге деформации. Кроме того, в случае овальной формы ручья калибра можно ожидать некоторого изменения в благоприятном направлении течения деформируемого металла.

Известно, что эллипс представляет собой плоскую кривую второго порядка, состоящую из множества точек, сумма расстояний которых от фокусов эллипса постоянна и равна длине его большей оси. Использование малого количества точек для задания геометрии эллипса, при изготовлении калибров на станках с ЧПУ, может привести к нарушению формы эллипса и, как следствие, к искажению параметров калибровки. С другой стороны, использование большого количества контрольных точек усложняет расчеты и изготовление калибров. Так, при поперечном сечении ручья калибров в виде эллипса необходимо балансировать между громоздкостью расчетов и точностью выполнения заданного профиля калибров. Овал Кассини, например, математически и графически выражается в виде выпуклой замкнутой кривой четвертого порядка, состоящей из множества точек, произведение которых от двух ее фокусов постоянно. То есть, эллипс – это кривая постоянной суммы расстояний до двух фиксированных точек (полюсов). Овал Кассини – кривая, являющаяся геометрическим местом точек, произведение расстояний от которых до двух фиксированных точек (фокусов) постоянно. В уравнении этой кривой содержится два независимых параметра: c – половина расстояния между фокусами и a – корень квадратный из произведения расстояний от фокусов до любой точки кривой. С

точки зрения формы овала существенно отношение параметров a и c , но не их величины. Применительно к использованию овала Кассини при построении профиля ручья калибров необходимо учитывать, что кривая становится овалом, а именно выпуклой замкнутой кривой, при условии

$$0 < \frac{c}{a} \leq \frac{1}{\sqrt{2}},$$

то есть при

$$a \geq c\sqrt{2}.$$

Следует заметить, что при $c = 0$, то есть когда полюса совмещаются, овал Кассини вырождается в окружность. При профилировании калибров диаметр этой окружности в первом приближении можно принимать равным наружному диаметру прокатываемой трубы в рассматриваемом сечении очага деформации.

Достоинство профилирования калибров с использованием овала Кассини состоит еще и в том, что эта кривая обеспечивает плавный переход от дна ручья до его реборд. В этом случае форма ручья и форма выпусков описываются одной кривой, определяющей тесноту ручья калибра и характер течения металла в окружном и продольном направлениях очага деформации. Рекомендации по выбору оптимальных величин параметров овала Кассини при соответствующем профилировании ручья калибров станок ХПТ пока в технической литературе не приведены. Однако можно ожидать позитивные результаты исследований в этом направлении.

Анализируя результаты исследований влияния конусности гребня ручья калибров на возникновение трещин на внутренней поверхности труб из малопластичных металлов, в том числе из титановых сплавов, которые проявляют склонность к трещинообразованию, следует обратить внимание на статью [14]. В этой работе на примере холодной прокатки труб из сталей ОХ18Н10Т, 12Х18Н10Т, 12Х18Н9, ЭП-350 из заготовки, отношение толщины стенки к диаметру которой находится в пределах 0,05–0,12 (это основной сортament холоднокатаных труб из указанных сталей), показано, что главным фактором, определяющим образование трещин, является утолщение стенки на участке редуцирования в очаге деформации. При этом уменьшение дробности деформации, обеспечиваемое увеличением подачи в процессе прокатки, и снижение конусности ручья калибров ослабляют опасность образования трещин на внутренней поверхности труб. Согласно результатам работы [14], трещины на внутренней поверхности труб из сталей аустенитного класса и ЭП-350 образуются, если на участке редуцирования в очаге деформации стенка трубы утолщалась в 1,18–1,25 раза. Эти данные относительно эффекта дробности деформации должны служить в некотором смысле ограничением при производстве холоднокатаных труб из сплавов на основе титана с высокими требованиями к точности их размеров, поскольку увеличение дробности деформации при прокатке уменьшает разностенность труб.

Изложенный анализ и сделанные выводы относятся к решению прямой задачи, а именно, к проектированию калибровки в том числе, расчету ширины ручья калибров для прокатки из заготовки радиусом R_3 с толщиной стенки t_3 готовых труб заданного размера при регламентированных принятой на предприятии технологией величинах подачи, а значит, дробности деформации, скорости прокатки (количества двойных ходов клетки стана ХПТ в единицу времени). В частности, при производстве труб из сплавов на основе титана величину подачи на станах ХПТ-75 обычно устанавливают равной ~ 10 мм, поскольку на станах этого типоразмера прокатывают толстостенные трубы. На станах ХПТ-55 – равной ~ 5 мм, ХПТ-32 – равной ~ 3 мм. При прокатке труб из сплавов на основе титана, характеризуемых отношением $t_3/D \geq 0,05$, на практике рекомендуется применять подачу 5 мм, а при $t_3/D \leq 0,05$ – 3 мм. При заданных размерах заготовки и готовых труб суммарная степень деформации металла известна априори. Этой исходной информации достаточно для расчета по выбранной методике профиля ручья калибров, величины их развалки, а также конусности оправки и изготовления согласно расчетным данным рабочего инструмента для прокатки труб конкретного размера.

В производственных условиях, однако, нередко возникает обратная задача. Состоит она в том, что при наличии на предприятии комплекта профилированных калибров и оправки стана ХПТ для прокатки из заготовки конкретного размера труб заданных размеров необходимо определить режимы прокатки, которые будут гарантировать необходимую точность размеров труб и обеспечивать другие требуемые показатели качества готовой продукции. Такая обратная задача сводится прежде всего к определению величины подачи при холодной прокатке труб. Решение ее путем определения из уравнений (1)–(3) зависимости величины подачи m , как функции входящих в эти уравнения переменных, приводит к громоздким выкладкам. Поэтому рассчитывать приемлемое значение m проще методом подбора подходящей величины. Кроме того, на производстве иногда в готовом комплекте рабочего инструмента меняют оправку для прокатки труб того же диаметра, но с другой толщиной стенки. В этом случае параметры оправки (диаметр, конусность) подбирают под профиль ручья имеющихся в наличии калибров и под заказанную толщину стенки готовых труб. Такой подход применим в случае, если различие в толщинах стенки прокатываемых труб не превышает 35–50 %.

Затрагивая вопрос профилирования выпусков ручья калибров, следует сослаться на работы [5, 11], в которых приведены заслуживающие внимания обширные экспериментальные данные. Исходная предпосылка при проведении исследований, результаты которых изложены в этих публикациях, состоит в том, что разностенность труб, прокатанных на станах ХПТ, является результатом протекания двух процессов – раскатки (уменьшения) исходной разностенности заготовки и возникновения во время прокатки новой, наведенной разностенности труб. По

данным, приведенным в статье [11], доля наведенной разностенности в суммарной поперечной разностенности составляет 2–5 %. Но эти значения следует рассматривать как ориентировочные, поскольку со времени их определения прошло много времени, за которое существенно усовершенствованы технология и конструкции станов холодной прокатки труб. Неоднозначным является также вывод о том, что «с увеличением вытяжки и увеличением подачи способность стана исправлять разностенность уменьшается». Действительно в таких случаях наведенная при прокатке разностенность возрастает. Но, если увеличение вытяжки происходит при возрастании степени деформации заготовки, то разностенность прокатанных труб будет уменьшаться. С выводом о том, что при подаче и повороте прокатываемой трубы в обоих (переднем и заднем) положениях клетки стана КРВ разностенность уменьшается, следует согласиться. Практика свидетельствует, что такое технологическое решение позволяет уменьшить поперечную разностенность в $\sim 1,5$ раза по сравнению с общепринятым режимом – подачей перед прямым ходом клетки и поворотом перед ее обратным ходом.

Результаты исследований влияния формы профиля ручья калибра в поперечном сечении на разностенность труб из титанового сплава Gr2 приведены в работах [5, с. 66–70; 11]. Показано, что при прокатке на стане ХПТ-32 труб $28 \times 3,2 \rightarrow 19,05 \times 2,3$ мм их разностенность была меньше в случае использования калибра с профилем ручья, образованным дугами окружностей с двумя радиусами («с выпуском по радиусу»), чем при профиле ручья, образованном эллипсами («по эллипсу»). Однако различие в разностенности 5,7 % и 6,1 % не является значительным. В этих же работах исследовано влияние величины угла 30 и 60° развалки профиля ручья калибров на точность труб из названного титанового сплава при прокатке на стане ХПТ-32 труб по маршруту $25 \times 4,1 \rightarrow 5,1 \times 24$ мм. Результаты производственных экспериментов показали, что разностенность труб при прокатке в калибрах с развалкой 30° была меньше на 2,58 %, чем при калибрах с развалкой 60°. Авторами этих работ были выполнены также заслуживающие внимания эксперименты по прокатке труб размером $30 \times 3,5 \rightarrow 16,08 \times 1,9$ мм из титанового сплава Gr2 при изменении угла развалки ручья калибров вдоль конуса деформации от 60° в начале ручья до 25° в зоне калибровки. Несмотря на то, что однозначных результатов относительно влияния фактора изменения развалки ручья калибров на разностенность прокатанных в этих экспериментах труб не получено, направление исследований следует признать перспективным.

Оптимизируя величину угла выпуска ручья калибров, необходимо обратить внимание на прозвучавшее в статье [12] предложение устанавливать этот угол в зависимости от степени деформации по диаметру прокатываемой трубы. Предложение было высказано применительно к решению задачи повышения точности труб, прокатываемых на станах холодной периодической роликовой прокат-

ки (ХПТР). Но высказанная идея заслуживает изучения также для условий прокатки труб на станах ХПТ. Авторы этой статьи полагают, что при холодной периодической прокатке целесообразно угол поворота трубы выбирать в зависимости от угла выпуска калибров. В частности, на станах ХПТР рекомендовано угол поворота прокатываемой трубы устанавливать равным двойному углу выпуска ручья ролика.

Постоянно совершенствуются не только калибровки станов ХПТ и ХПТР, но и валковопилигримовых и непрерывных станов горячей прокатки труб [8 и др.]. Так, в статье [15] проанализировано состояние и тенденции развития производства холоднокатаных труб из сплавов на основе титана, отмечается, что для прокатки труб на непрерывном раскатном стане ТПА-80 традиционно применяют следующие типы калибров: в первой клетке – овалный со скругленными выпусками; со второй по шестую – круглые со скругленными выпусками; в седьмой и восьмой клетках – овалы. Недостатки этой калибровки заключаются в неравномерности деформаций прокатываемого металла по периметру калибров из-за наличия выпусков. Авторы указанной статьи предложили десятигранную форму калибра в поперечном сечении, которая по их мнению и результатам испытаний обладает преимуществами по сравнению с круглой формой, поскольку обеспечивает меньшую неравномерность деформации прокатываемых труб.

Другой пример. Пилигримовый способ горячей прокатки толстостенных труб большого диаметра по своей сути подобен процессу холодной прокатки труб на станах ХПТ. Совершенствование калибровок валков пилигримовых станов ведется в том же направлении, что и калибров станов ХПТ. Например, в работе [16] сообщается, что для уменьшения неравномерности деформации в поперечном сечении прокатываемой трубы-гильзы профиль калибра пилигримового стана выполняют с переменным углом выпуска. То есть, при выборе калибровок валков пилигримовых станов особое внимание уделяется определению угла и формы выпусков, как и при профилировании калибров станов ХПТ.

Повышение жесткости клетей станов ХПТ последнего поколения [4] положительно сказывается на точности прокатываемых труб. Известны предложения учитывать упругую деформацию прокатных клетей, валковых систем, оправок и калибров станов ХПТ при их профилировании [4, с. 150–157]. Несмотря на полезность этих предложений реализация их сопряжена со значительными трудностями как научного, так и практического плана. Отметим следующее.

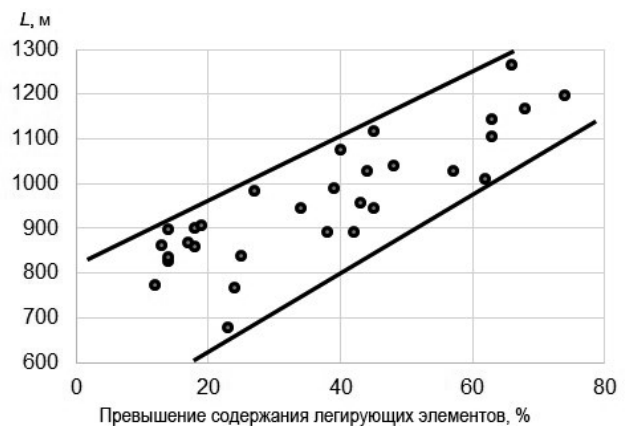
Процесс холодной прокатки труб на станах ХПТ характеризуется пошаговым деформированием прокатываемой заготовки. При этом на каждом шаге, при каждом следующем двойном ходе клетки повторяются обжатия и напряженное состояние металла в очаге деформации, величины упругих деформаций валкового узла, калибров, оправки и непосредственно клетки по мере ее возвратно-поступательных движений (двойных ходов). Поэтому допустимо прогнозировать создание в перспективе систем автоматического ре-

гулирования процесса пильгерной прокатки, которые будут непрерывно отслеживать силу прокатки и возникающие упругие деформации всех узлов стана ХПТ и на основании получаемой информации подстраивать положение нажимных винтов и параметры процесса для минимизации отклонений от нормы размеров прокатываемых труб. При производстве труб из дорогостоящих металлов, какими являются сплавы на основе титана, такое развитие их производства вполне вероятно.

На точность прокатываемых труб существенно влияет износ ручья калибров по их глубине и ширине. Авторы монографии [2, с. 211] подчеркивают необходимость учета этого фактора при проектировании калибровок станов ХПТ. Однако предложенные в монографии рекомендации носят слишком общий характер и поэтому требуют привязки к условиям конкретного производства.

Автором данной статьи выполнены исследования зависимости объемов прокатанных труб из титановых сплавов от износостойкости калибров станов ХПТ. Установлено, что продолжительность эксплуатации калибров и, соответственно, количество труб, прокатанных одной парой калибров, существенно зависят от химического состава стали 60ХФА, из которой они были изготовлены. Согласно ДСТУ 3-009-0, содержание легирующих элементов в стали 60ХФА составляет, %: С (0,55–0,65); Mn (0,5–0,8); Si (0,17–0,37), V (0,1–0,2), Cr (0,8–1,1). На практике содержание этих легирующих элементов в стали изменяется случайным образом в пределах требований ДСТУ 3-009-0 от минимальных значений до максимальных. Такие изменения химического состава стали даже в сравнительно узких диапазонах заметно влияют на износостойкость и продолжительность эксплуатации калибров, а в результате – на точность прокатываемых труб из титановых сплавов. Недостаточная износостойкость калибров нередко приводит к их замене на новые (к перешлифовке) и в целом ухудшает экономические показатели производственного процесса.

На рисунке показана зависимость количества прокатанных метров труб на стане ХПТ-55 из



Зависимость количества (L в метрах) прокатанных труб на стане ХПТ-55 от превышения минимального содержания легирующих элементов в составе стали 60ХФА, из которой изготовлены калибры

титанового сплава от содержания легирующих элементов в стали 60ХФА, из которой были изготовлены калибры. По оси абсцисс на рисунке отложены величины относительной разности между суммарным содержанием легирующих элементов в стали каждой пары калибров и суммой минимальных значений содержания каждого элемента в стали 60ХФА, согласно ДСТУ 3-099-0, выраженной в процентах. Количество метров труб, прокатанных на одной паре калибров, является мерой нагружения калибров за компанию их эксплуатации, до выхода за пределы допустимых размеров профиля и формы их ручья. Подобным образом оценивается износ, например, валков листовых станов [7, с. 113–116; 17].

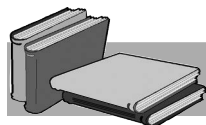
Согласно приведенным на рисунке данным, износостойкость калибров существенно возрастает при увеличении суммарного содержания легирующих элементов в составе стали 60ХФА, из которой калибры были изготовлены. Учитывая эту закономерность, можно рекомендовать ужесточение требований к содержанию легирующих элементов в стали 60ХФА, выплавляемой по ДСТУ 3-009-0 и используемой для изготовления калибров станов ХПТ. При производстве труб из сплавов на основе титана, обусловленное такой рекомендацией удорожание стоимости калибров будет перекрыто положительным эффектом от применения калибров с повышенной износостойкостью.

Решение задачи повышения точности холоднокатаных труб из сплавов на основе титана обеспечи-

вает не только исключение случаев отклонения их размеров за пределы обусловленных стандартами допусков по диаметру и толщине стенки, а и создает предпосылки для массового производства труб в минусовом поле допусков. Количество отгружаемых заказчикам холоднокатаных труб из титановых сплавов измеряется в метрах. При диаметре и толщине стенки труб в минусовом поле допусков их длина в метрах увеличивается. Поскольку холоднокатаные трубы из титановых сплавов стоят дорого, то приращение их метража за счет уменьшения поля допусков приводит к ощутимому экономическому эффекту у производителя этой продукции.

Выводы

Выполненный анализ позволяет утверждать, что резервы повышения точности холоднокатаных труб из титановых сплавов далеко не исчерпаны. В этой теме дальнейшего углубленного исследования заслуживают вопрос влияния структуры и свойств сплавов на их пластическое течение в очаге деформации при пильгерной прокатке, возможности развития методик построения калибровок рабочего инструмента станов ХПТ, направления реализации на этих станах комплекса систем автоматического управления процессом прокатки.

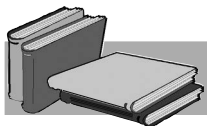


ЛІТЕРАТУРА

1. Орро П.И., Осада Я.Е. Производство стальных тонкостенных бесшовных труб. Харьков – Москва: Metallurgizdat, 1951. 416 с.
2. Кофф З.А., Соловейчик П.М., Алешин В.А., Гриншпун М.И. Холодная прокатка труб. Свердловск: Metallurgizdat, 1962. 430 с.
3. Шевакин Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб. М.: Metallurgizdat, 1963. 269 с.
4. Фролов В.Ф., Данченко В.Н., Фролов Я.В. Холодная пильгерная прокатка труб. Монография. Дніпропетровськ: «Пороги», 2005. 255 с.
5. Григоренко В.У., Пилипенко С.В., Головченко О.П. Развитие методу розрахунку параметрів процесу холодної пильгерної прокатки труб і калібрівки інструмента. Дніпропетровськ: «Пороги», 2015. 2127 с.
6. Мищенко А.В. Состояние и тенденции развития производства холоднокатаных труб из сплавов на основе титана. *Металл и литье Украины*. 2019. № 3–4 (310–311). С. 58–68.
7. Мелешко В.И., Чекмарев А.П., Мазур В.Л., Качайлов А.П. Отделка поверхности листа. М.: Metallurgiya, 1975. 272 с.
8. Данченко В.Н., Фролов Я.В. Развитие научных основ процесса холодной и теплой пильгерной прокатки. В сб. «Развиток теорії процесів виробництва труб». Дніпропетровськ: Системні технології, 2005. С. 134–156.
9. Кузнецов Е.Д. Развитие теории и практики производства прецизионных стальных труб. В сб. «Развиток теорії процесів виробництва труб». Дніпропетровськ: Системні технології, 2005. С. 232–259.
10. Кузнецов Д.Е. Анализ методов расчета ширины калибров станов ХПТ. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2013. № 5. С. 50–51.
11. Пилипенко С.В. Исследование изменения разностенности труб в ходе прокатки на стане ХПТ. *Сталь*. 2016. № 3. С. 32–37.
12. Король Р.Н., Амиров И.М. Резервы повышения точности и качества труб, прокатанных на станах холодной периодической роликовой прокатки (ХПТР). *Металл и литье Украины*. 2007. № 5. С. 54–59.
13. Фролов Я.В., Дехтярев В.С. Развитие методов расчета калибровки станов ХПТ. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2009. № 2. С. 52–54.

14. Кучеренко В.Р., Хаустов Г.И., Коробочкин И.Ю., Кекух С.Н. Влияние редуцирования на качество внутренней поверхности труб при холодной прокатке. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1979. № 2. С. 19–20.
15. Овчинников Д.В., Горожанин П.Ю., Бодров А.Ю., Орлов Г.А., Ашканов С.Е. Усовершенствованная калибровка валков непрерывного трубопрокатного стана. *Сталь*. 2014. № 9. С. 50–52.
16. Осадчий В.Я., Сафьянов А.В., Бураков Т.П. и др. Разработка и внедрение технологии производства бесшовных труб на ТПА с пилигримовым станом в валках новых калибровок. *Сталь*. 2016. № 2. С. 38–42.
17. Mazur, V.L., Nogovitsyn, A.V. Theory and Technology of Sheet Rolling. Numerical Analysis and Applications, Boca Raton: CRC Press, 2019. 479 p. URL: <https://www.crcpress.com/Theory-and-Technology-of-Sheet-Rolling-Numerical-Analysis-and-Applications/Mazur-Nogovitsyn/p/book/9780815387060>

Надійшла 01.11.2019



REFERENCES

1. Orro, P.I., Osada, Ya.E. (1951). Production of steel thin-walled seamless pipes. Har'kov – Moscow: Metallurgizdat, 416 p. [in Russian].
2. Koff, Z.A., Solovejchik, P.M., Aleshin, V.A., Grinshpun, M.I. (1962). Cold rolling pipes. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 430 p. [in Russian].
3. Shevakin, Yu.F. (1963). Calibration and efforts during cold rolling of pipes. Moscow: Metallurgizdat, 269 p. [in Russian].
4. Frolov, V.F., Danchenko, V.N., Frolov, Ya.V. (2005). Cold pilger tube rolling. Monograph. Dnipropetrovs'k: "Porogi", 255 p. [in Russian].
5. Grigorenko, V.U., Pilipenko, S.V., Golovchenko, O.P. (2015). Rositon to the method of calculation parameters in the process of cold rolling pipe rolling and calibration of the tool. Dnipropetrovs'k: "Porogi", 2127 p. [in Ukrainian].
6. Mishchenko, A.V. (2019). Status and development trends of the production of cold-rolled pipes from titanium-based alloys. *Metal and Casting of Ukraine*, no. 3–4 (310–311), pp. 58–68 [in Russian].
7. Meleshko, V.I., Chekmarev, A.P., Mazur, V.L., Kachajlov, A.P. (1975). Finishing the surface of the sheet. Moscow: Metallurgiya, 272 p. [in Russian].
8. Danchenko, V.N., Frolov, Ya.V. (2005). Development of the scientific foundations of the process of cold and warm pilger rolling. Rozvytok teorii protsesiv vyrobnytstva trub. Dnipropetrovs'k: Systemni tekhnologii, pp. 134–156 [in Russian].
9. Kuznetsov, E.D. (2005). Development of the theory and practice of the production of precision steel pipes. Rozvytok teorii protsesiv vyrobnytstva trub. Dnipropetrovs'k: Systemni tekhnologii, pp. 232–259 [in Russian].
10. Kuznetsov, D.E. (2013). Analysis of methods for calculating the width of calibers of CPT mills. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*, no. 5, pp. 50–51 [in Russian].
11. Pilipenko, S.V. (2016). The study of changes in the difference in the pipes during rolling at the HPT mill. *Stal'*, no. 3, pp. 32–37 [in Russian].
12. Korol', R.N., Amirov, I.M. (2007). Reserves of improving the accuracy and quality of pipes rolled on cold periodic rolling mills (HPTR). *Metal and Casting of Ukraine*, no. 5, pp. 54–59 [in Russian].
13. Frolov, Ya.V., Dekhtiarev, V.S. (2009). Development of methods for calculating calibration of HPT mills. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*, no. 2, pp. 52–54 [in Russian].
14. Kucherenko, V.R., Haustov, G.I., Korobochkin, I.Yu., Kekukh, S.N. (1979). The effect of reduction on the quality of the inner surface of pipes during cold rolling. *Metallurgical and mining industry*, no. 2, pp. 19–20 [in Russian].
15. Ovchinnikov, D.V., Gorozhanin, P.Yu., Bodrov, A.Yu., Orlov, G.A., Ashkanov, S.E. (2014). Advanced calibration of rolls of a continuous tube mill. *Stal'*, no. 9, pp. 50–52 [in Russian].
16. Osadchii, V.Ya., Safianov, A.V., Burakov, T.P. et al. (2016). Development and implementation of the technology for the production of seamless pipes on TPA with a pilgrim mill in rolls of new calibrations. *Stal'*, no. 2, pp. 38–42 [in Russian].
17. Mazur, V.L., Nogovitsyn, A.V. (2019). Theory and Technology of Sheet Rolling. Numerical Analysis and Applications, Boca Raton: CRC Press, 479 p. URL: <https://www.crcpress.com/Theory-and-Technology-of-Sheet-Rolling-Numerical-Analysis-and-Applications/Mazur-Nogovitsyn/p/book/9780815387060>.

Received 01.11.2019

Анотація

О.В. Міщенко, здобувач, e-mail: mishchenkooleksii@gmail.com

Національна металургійна академія України (Дніпро, Україна)

Розвиток ідеології розробки калібровок інструменту для холодної прокатки труб зі сплавів на основі титану

Статтю присвячено висвітленню питань калібровок і стійкості деформуючого інструменту станів холодної прокатки труб (ХПТ) при виробництві труб з титанових сплавів. Проаналізовано стан і тенденції методів побудови калібровок для холодної прокатки труб зі сплавів на основі титану. Розглянуто основні типи калібровок, їх переваги та недоліки, а також завдання, які ставляться перед сучасними калібровками. Відзначено висновки і рекомендації, які мають пряме відношення до поліпшення якості холоднокатаних труб саме з титанових сплавів шляхом підвищення точності їх розмірів. Розглянуто дані про вплив величини розвалки на точність труб, що прокатуються на станах ХПТ. В ході аналізу було проведено порівняння калібровок, засноване на геометрії поперечного перерізу еліпса і овалу Кассіні. Виділені переваги овалу Кассіні дозволяють поліпшити точність поперечного перерізу труб, що прокатуються, і надати широкі можливості по розподілу обтиснень при проектуванні калібровок. Це дозволяє рекомендувати овал Кассіні до використання в якості профілю поперечного перерізу калібрів. Розглянуто актуальність замкнутих рішень при якісному аналізі впливу планованих технологічних режимів процесу холодної прокатки труб на вибір ширини рівчака калібрів. Виконано дослідження залежності обсягів прокатаних труб з титанових сплавів від зносостійкості калібрів станів ХПТ. Визначено залежності зносостійкості калібрів від обсягів прокатаних труб з титанових сплавів, що продемонструвало наочний вплив хімічного складу матеріалу калібрів на їх зносостійкість в ході роботи. Отримані в ході дослідження результати дозволили зробити ряд важливих висновків з можливості розвитку методики побудови калібровок робочого інструмента станів ХПТ і запропонувати рекомендації щодо підвищення зносостійкості калібрів при холодній прокатці труб зі сплавів на основі титану.

Ключові слова

Труби, титан, сплави, холодна прокатка труб, калібрування прокатного інструменту, овал Кассіні, зносостійкість калібрів.

Summary

A.V. Mishchenko, Applicant, e-mail: mishchenkooleksii@gmail.com

National Metallurgical Academy of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

Development of the ideology of calibrations of the tool for cold rolling of pipes from alloys based on titanium

The article is devoted to the issues of calibration and durability of the deforming tool of cold rolling tube mill (CRTM) in the production of titanium alloy pipes. The state and tendencies of methods of construction of calibrations for cold rolling of pipes from alloys based on titanium are analyzed. The main types of calibrations, their advantages and disadvantages, as well as the tasks that are set before modern calibrations are considered. Conclusions and recommendations directly related to improving the quality of cold-rolled pipes made of titanium alloys by increasing the accuracy of their dimensions are noted. The data on the influence of the size of the camber on the accuracy of rolled pipes in the CRTM was analyzed. The analysis compared calibrations based on the cross-sectional geometry of the Cassini ellipse and oval. The highlighted advantages of Cassini oval will improve the accuracy of the cross-section of rolled pipes and provide many opportunities for the distribution of crimps in the design of calibrations. This allows the Cassini oval to be recommended for use as a cross-sectional profile of calibres. The relevance of closed solutions in the qualitative analysis of the influence of the planned technological regimes of the cold rolling process of pipes on the choice of the width of the gauges is considered. The investigation of the dependence of the volume of rolled tubes from titanium alloys from wear calibres CRTM was carried out. Dependences of wear resistance of gauge on volumes of rolled pipes from titanium alloys are defined that showed the evident influence of the chemical composition of the material of gauges on their wear resistance during work. The results obtained in the course of the research allowed us to represent a number of important conclusions on the possibility of developing methods for constructing calibrations of working tools of CRTM and to suggest recommendations for improving the wear resistance of calibres during cold rolling of titanium-based alloy pipes.

Keywords

Pipes, titanium, alloys, cold rolling of pipes, calibration of rolling tools, Cassini oval, wear resistance of calibres.