

УДК 621.774

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЛИБРОВКИ РУЧЬЯ КАЛИБРА СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ $Q$ -ФАКТОРА ВДОЛЬ КОНУСА ДЕФОРМАЦИИ

*канд. техн. наук, доц. С.В. ПИЛИПЕНКО  
(Полоцкий государственный университет)*

*Приведены результаты исследования влияния параметров калибровки ручья калибра стана холодной прокатки труб на изменение распределения  $Q$ -фактора вдоль конуса деформации. От величины  $Q$ -фактора зависит, как будут ориентироваться зерна металла – радиально или тангенциально, что оказывает значительное влияние на механические характеристики труб. Определено, что степень крутизны обуславливает характер распределения  $Q$ -фактора вдоль конуса деформации. Найдены наиболее оптимальные значения степени крутизны и начальной конусности (с точки зрения распределения  $Q$ -фактора и силы прокатки вдоль зоны обжатия).*

**Ключевые слова:** стан ХПТ, оптимальное распределение,  $Q$ -фактор, сила прокатки, параметры калибровки.

**Введение.** Холоднокатаные трубы из титановых и циркониевых сплавов широко используются в атомной промышленности (оболочки ТВЕЛ и пр. [1]), авиакосмической отрасли (гидросистемы самолетов и пр. [3–6]) и других отраслях, для изготовления деталей машин ответственного назначения [1–4]. К данным трубам предъявляются повышенные требования как к наличию определенного типа текстуры [5–7], так и к обеспечению высокой точности геометрических размеров поперечного сечения (AMS 4945, AMS 4946, OСТ1 90065-72) [3]. Трубы указанного сортамента изготавливаются методом холодной пильгерновой прокатки на станах ХПТ и ХПТР. Одним из параметров, оказывающих значительное влияние на механические свойства и текстуру металла труб, является  $Q$ -фактор (отношение действительной деформации по толщине стенки к действительной деформации по среднему диаметру трубы).

**Материалы и инструменты.** Для анализа выбран промежуточный маршрут прокатки трубы из сплава Ti-3Al-2.5V на стане ХПТ-55 – 50,8x4, 75-38, 1x2, 275. Именно к данному виду трубопрокатной продукции предъявляются требования по распределению  $Q$ -фактора вдоль конуса деформации (согласно стандарту AMS 4945). В данном маршруте можно выделить следующее: максимально возможная начальная конусность оправки с криволинейной образующей формы рабочей поверхности  $2\text{tg}\alpha = 0,016$ ; длина рабочей зоны оправки – 380 мм; длина конуса деформации (при начальном диаметре ведущей шестерни 336 мм) – 445 мм. Расчет распределения  $Q$ -фактора вдоль конуса деформации производился по контрольным точкам калибровки рабочего инструмента (57 сечений от пережима до конца зоны редуцирования).

Распределение  $Q$ -фактора вдоль конуса деформации производилось для следующих случаев выполнения калибровки инструмента:  $2\text{tg}\alpha = 0,005$ ;  $2\text{tg}\alpha = 0,01$ ;  $2\text{tg}\alpha = 0,015$ ;  $n = 1,5$ ;  $n = 2,5$ ;  $n = 3,5$ . Расчетная величина подачи  $m = 5$  мм. Кроме распределения  $Q$ -фактора рассчитывались изменения силы прокатки в контрольных сечениях вдоль конуса.

**Цель работы** – определение влияния степени крутизны образующей развертки ручья калибра ( $n$ ) стана ХПТ на изменение распределение величины  $Q$ -фактора вдоль конуса деформации.

**Анализ исследований.** Холодной пильгерновой валковой прокаткой труб производят прецизионные трубы с повышенными требованиями к чистоте наружной и внутренней поверхностей, точности их геометрических размеров, микро- и макроструктуре и механическим свойствам их материала и пр. [8–13]. Холодная прокатка – это многопроходный процесс. Например, труба размером 19x0,6 мм изготавливается за семь проходов на станах ХПТ-120, ХПТ-90, ХПТ-75, ХПТ-55, ХПТ-32 (поочередно) по маршруту 137x21 мм → 114x13 мм → 95x8 мм → 80x5 мм → 63x3 мм → 42x1,9 мм → 25x1,1 мм → 19x0,6 мм. Суммарные деформации по проходам составляют 46,1% → 47% → 46,1% → 52% → 57,7% → 65,5% → 58% соответственно [3]. Расходный коэффициент металла на таком технологическом маршруте ~ 1,55 [3]. После каждого прохода осуществляется ряд операций промежуточной отделки: обезжиривание после прокатки (снятие смазки), термообработка, травление, контроль качества и порезка, нанесение подмазочного слоя и смазки, далее трубы снова прокатываются на стане ХПТ.

Для каждого прохода, исходя из параметров трубы-заготовки и готовой или пердедельной трубы, можно рассчитать величину  $Q$ -фактора:

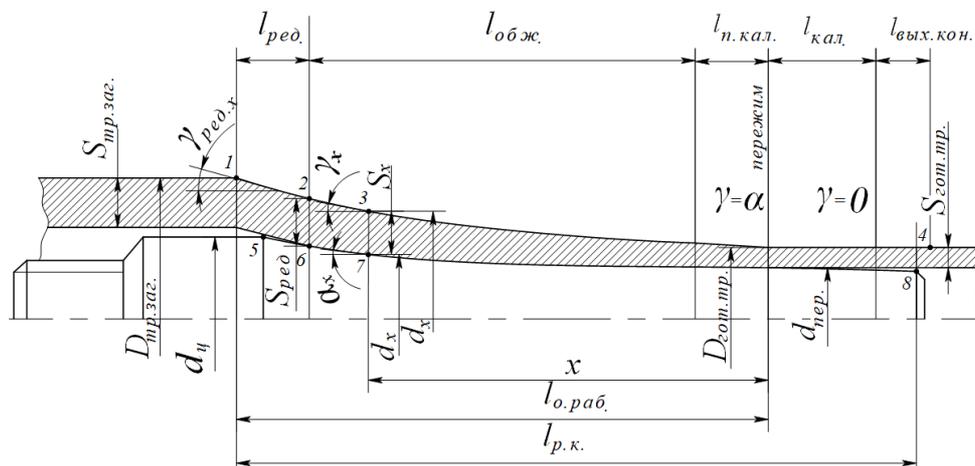
$$Q = \frac{\ln \frac{S_{\text{тр.заг.}}}{S_{\text{гот.тр.}}}}{\ln \frac{D_{\text{тр.заг.}} - S_{\text{тр.заг.}}}{D_{\text{гот.тр.}} - S_{\text{гот.тр.}}}}, \quad (1)$$

где  $S_{тр.заг.}$  – толщина стенки трубы-заготовки;  
 $D_{тр.заг.}$  – диаметр трубы-заготовки;  
 $S_{гот.тр.}$  – толщина стенки готовой или передельной трубы;  
 $D_{гот.тр.}$  – диаметр трубы готовой или передельной трубы.

Однако в станах холодной пильгерной прокатки труба, проходя конус деформации, обжимается много раз (в зависимости от длины конуса деформации, величины обжатия и величины подачи). Сам процесс ХПТ можно представить как движущийся вдоль конуса мгновенный очаг деформации (МОД), параметры которого постоянно изменяются. Поэтому кроме информации об общей величине  $Q$ -фактора за проход необходимо знать распределение его величины вдоль конуса деформации. В каждом контрольном сечении величину  $Q$ -фактора можно рассчитать по формуле

$$Q = \frac{\ln \frac{S_{i-1}}{S_i}}{\ln \frac{D_{i-1} - S_{i-1}}{D_i - S_i}}, \quad (2)$$

где  $S_{i-1}$  – толщина стенки трубы до деформации в мгновенном очаге деформации;  
 $D_{i-1}$  – диаметр трубы до деформации в мгновенном очаге деформации;  
 $S_i$  – толщина стенки после деформации в мгновенном очаге деформации;  
 $D_i$  – диаметр трубы после деформации в мгновенном очаге деформации.



кривые 1, 2, 3, 4 и 5, 6, 7, 8 – соответственно продольные профили оправки и рабочего конуса (конуса деформации); сечение конуса 2–6 – конец участка редуцирования; 3–7 – сечение профиля в участке, отстоящего от пережима на расстоянии  $x$ ;  $d_{ц}$ ,  $d_{пер.}$  – диаметры оправки в цилиндрической части и в пережиме;  $D_x$ ,  $d_x$  – диаметры рабочего конуса и оправки в сечении  $x$ ;  $\alpha_x$  – конусность оправки в сечении  $x$ ;  $\gamma_{ред.x}$  – конусность развертки калибра в сечении  $x$  зоны редуцирования;  $\gamma_x$  – конусность развертки калибра в любом сечении  $x$ ;  $l_{р.к.}$ ,  $l_{обж.}$ ,  $l_{кал.}$ ,  $l_{п.кал.}$  – длины участков рабочего конуса соответственно: рабочего, обжимного, калибрующего, предкалибрующего (предотделки), калибровки, обратного (выходного)

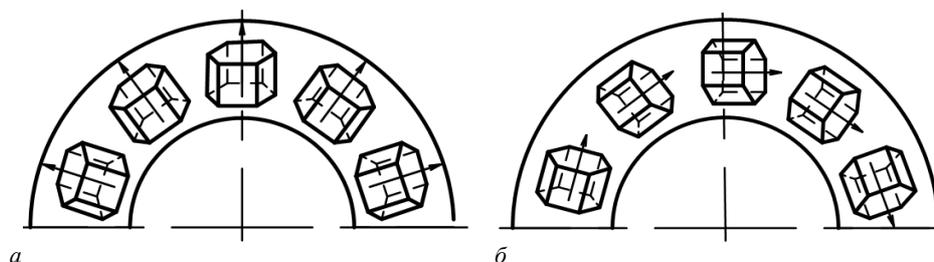
Рисунок 1. – Конус с оправкой, имеющей криволинейную образующую формы рабочей поверхности в момент, после которого следует подача перед очередным двойным ходом [6–14]

От величины  $Q$ -фактора зависит, как зерна металла трубы будут ориентированы после деформации и последующей термообработки (рисунок 2) [1; 6–8]. Требования к характеру распределения и величине  $Q$ -фактора внесены в стандарт на определенные виды трубопрокатной продукции (см. выше).

При использовании труб в гидросистемах (в авиационной и космической отрасли) и др. необходимо, чтобы материал трубы имел радиальную текстуру. Такие трубы имеют более благоприятное сочетание прочности и пластичности, повышенную усталостную прочность и пр. [1; 4; 5; 7; 9]. Для достижения такого эффекта величина  $Q$ -фактора во всех сечениях зоны обжатия вдоль конуса деформации должна быть не ниже единицы. Слишком большие значения  $Q$ -фактора тоже нежелательны, т.к. чрезмерное количество зерен будут радиально ориентированы и трубы не пройдут испытания на механические характеристики.

В формулу определения величины  $Q$ -фактора входит величина обжатия по среднему диаметру трубы и обжатия по толщине стенки, поэтому все факторы, от которых зависят эти параметры (даже

температурные искажения геометрических параметров рабочего инструмента), оказывают влияние в той или иной степени. На характер распределения  $Q$ -фактора вдоль конуса деформации влияют такие параметры процесса ХПТ [1; 4; 5; 7; 9; 14–17], как тип применяемой оправки (конусная или с криволинейной образующей); ее конусность (для конусных оправок); начальная конусность и степень крутизны рабочего профиля оправки и калибра (при применении оправки с криволинейной образующей рабочего профиля); заложенный в распределении диаметров калибра и диаметров оправки режим деформации по толщине стенки; величина и характер колебаний толщины стенки трубы-заготовки и пр. Степень влияния каждого из факторов до конца не изучена, любые исследования в этой области являются актуальными.



**а** – высокое значение  $Q$ -фактора, радиальная структура;  
**б** – низкое значение  $Q$ -фактора, тангенциальная структура [15]

**Рисунок 2.** – Влияние распределения значений  $Q$ -фактора на текстуру металла труб

При расчете калибровки рабочего инструмента распределение диаметров калибра по контрольным сечениям конуса деформации определяют по формуле [14]

$$D_i = D_{mp.зак.} + (D_{zom.мп.} - D_{zom.мп.} - \gamma_{min} \cdot l) \left( \frac{x}{l} \right)^n + \gamma_{min} \cdot x, \text{ мм}, \quad (3)$$

где  $\gamma_{min}$  – минимальная конусность ручья в конце конуса деформации;  
 $x$  – координата сечения;  
 $n$  – степень крутизны образующей развертки ручья калибра;  
 $l$  – длина зоны обжатия конуса деформации.

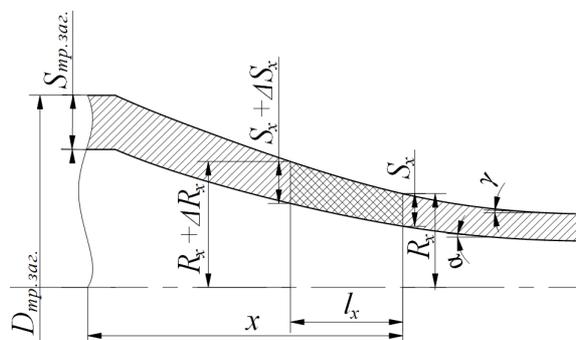
По аналогичной формуле находят диаметры оправки в тех же контрольных сечениях [14]:

$$d_i = d_{нер.} + (d_y - d_{нер.} - \alpha_{min} \cdot l) \left( \frac{x}{l} \right)^n + \alpha_{min} \cdot x, \text{ мм}, \quad (4)$$

где  $\alpha_{min}$  – минимальная конусность оправки перед сечением пережима.

Один из параметров, влияющих на распределение величины обжатия по толщине стенки и обжатия по диаметру вдоль конуса деформации, – это степень крутизны образующей развертки ручья калибра.

**Основная часть.** Толщину стенки трубы и диаметр трубы до деформации вычисляют методом интерполяции данных калибровки.



**Рисунок 3.** – Схема к определению величины обжатия вдоль конуса деформации за двойной ход клетки

Исходными данными для интерполяции служила величина смещения каждого рассматриваемого сечения в ходе пластической деформации за двойной ход клетки (см. рисунок 3), которая рассчитывалась по формуле [18; 19]

$$l_x = \frac{\sqrt{S_x^2 + 2(\operatorname{tg}\gamma_x - \operatorname{tg}\alpha_x) \frac{mS_{\text{пр.зак.}}(S_{\text{пр.зак.}} - D_{\text{пр.зак.}})}{D_x - S_x}} - S_x}{\operatorname{tg}\gamma_x - \operatorname{tg}\alpha_x}, \text{ мм}, \quad (5)$$

где  $m$  – величина подачи трубы перед двойным ходом;

$\operatorname{tg}\alpha_x$  и  $\operatorname{tg}\gamma_x$  – конусность оправки и конусность образующей развертки ручья калибра на рассматриваемом участке калибровки.

На рисунке 4 показаны графики распределения  $Q$ -фактора в случае калибровки инструмента при начальной конусности оправки  $2\operatorname{tg}\alpha = 0,005$ . Начальная конусность развертки калибра ( $2\operatorname{tg}\gamma$ ) тоже равна указанной величине  $2\operatorname{tg}\alpha$  (здесь и далее). Как видно, при  $n = 1,5$  вдоль зоны обжатия конуса деформации наблюдается постоянное увеличение  $Q$ -фактора. Вблизи и на протяжении зоны предотделки наблюдается падение этой величины (до  $Q = 2,41$ ). Максимальное значение  $Q$ -фактора – 3,71 (49-е сечение), в начале зоны обжатия  $Q = 2,4$ . График силы прокатки коррелируется с графиком распределения  $Q$ -фактора. Начиная с 248,9 кН, значения силы прокатки сначала возрастают до величины 326,18 кН (41-е сечение), далее наблюдается плавное снижение этого значения до 138,15 кН в конце предотделки. Такое распределение  $Q$ -фактора вдоль конуса является одним из оптимальных характеров распределения этой величины. Распределение силы прокатки (с пиком в конце) не является приемлемым, т.к. повышенная сила прокатки вызовет усиление упругих деформаций клетки, что может отрицательно сказаться на качестве геометрии труб и качестве их внешней поверхности.

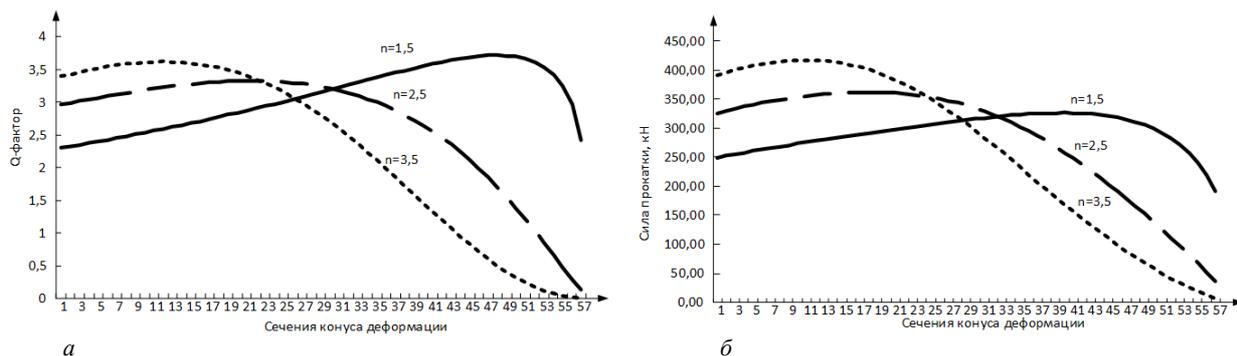


Рисунок 4. – Распределение вдоль конуса деформации  $Q$ -фактора (а) и силы прокатки (б) при  $2\operatorname{tg}\alpha = 0,005$  (сплав Gr-2, ХПТ-55, маршрут – 50, 8x4, 75-38, 1x2, 275,  $m = 5$ )

При  $n = 2,5$  и  $2\operatorname{tg}\alpha = 0,005$  (см. рисунок 4) наблюдается куполообразный график распределения  $Q$ -фактора вдоль зоны обжатия. Наибольшее значение  $Q = 3,323$  в 23-м сечении. В конце зоны обжатия  $Q$ -фактор принимает значение 1,031 и далее; в зоне предотделки (здесь калибруется толщина стенки) значение  $Q$ -фактора падает до 0,128. Эта зона не предназначена для обжатия стенки, она обеспечивает ее точность. Распределение силы прокатки тоже имеет куполообразный характер с максимумом  $P = 361,72$  кН в 19-м сечении. После него идет плавное снижение значений этой величины до 97,1 кН в конце зоны обжатия и 16,53 кН в конце зоны предотделки. Это один из оптимальных характеров распределения силы прокатки вдоль конуса. Следует заметить, что в зоне обжатия  $Q$ -фактор не падает ниже единицы, что тоже является приемлемым вариантом распределения  $Q$ -фактора.

При  $n = 3,5$  и  $2\operatorname{tg}\alpha = 0,005$  (см. рисунок 4) также, как и в предыдущем случае, наблюдается куполообразный график  $Q$ -фактора вдоль зоны обжатия, но с пиком  $Q = 3,617$  в 13-м сечении. В конце зоны обжатия  $Q = 0,11$ , в конце зоны предотделки  $Q = 0,005$ . Значения  $Q$ -фактора опускаются ниже единицы уже в 45-м сечении. Этот случай не является оптимальным с точки зрения распределения  $Q$ -фактора. Купол силы прокатки имеет пик в 417 кН в 12-м сечении, в конце зоны обжатия  $P = 41,48$  кН, в конце зоны предотделки – 2,18 кН. Из ранее рассмотренных случаев такое распределение силы прокатки вдоль конуса деформации является наиболее оптимальным.

Далее рассматриваем распределения  $Q$ -фактора в случае калибровки рабочего инструмента стана ХПТ с  $2\operatorname{tg}\alpha = 0,01$  (рисунок 5).

При  $2\text{tg}\alpha = 0,01$  и  $n = 1,5$  характер изменения  $Q$ -фактора вдоль зоны обжатия остался прежним (как и при  $2\text{tg}\alpha = 0,005$ ), но с меньшим максимум ( $Q = 3,402$ ) в 43-м сечении. Разница в значениях силы прокатки (в сравнении с  $2\text{tg}\alpha = 0,005$  и тем же значением степени крутизны) меньше одного процента во всех сечениях.

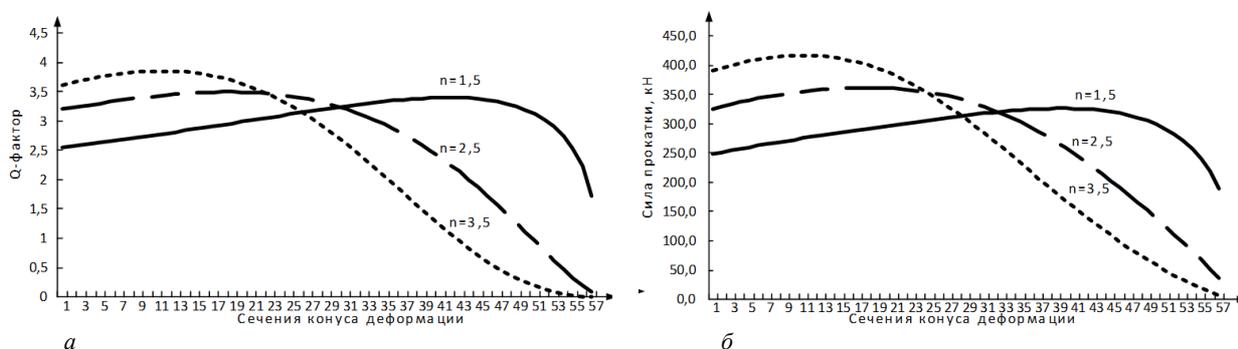


Рисунок 5. – Распределение вдоль конуса деформации  $Q$ -фактора (а) и силы прокатки (б) при  $2\text{tg}\alpha = 0,01$  (сплав Gr-2, ХПТ-55, маршрут – 50, 8x4, 75-38, 1x2, 275,  $m = 5$ )

При  $2\text{tg}\alpha = 0,01$  и  $n = 2,5$  (см. рисунок 5) снова получаем куполообразное распределение  $Q$ -фактора (как и при  $2\text{tg}\alpha = 0,005$  и  $n = 2,5$ ) с пиком в  $Q = 3,496$  в 19-м сечении. Разница в значениях силы прокатки (в сравнении с  $2\text{tg}\alpha = 0,005$  и  $n = 2,5$ ) также меньше одного процента во всех сечениях.

При  $2\text{tg}\alpha = 0,01$  и  $n = 3,5$  (см. рисунок 5) имеем то же куполообразное распределение  $Q$ -фактора (как и при  $2\text{tg}\alpha = 0,005$  и  $n = 3,5$ ) с пиком в  $Q = 3,8535$  в 13-м сечении, с той же сравнительной разницей в значениях силы прокатки. Интересно, что значения  $Q$ -фактора в конце зоны обжатия несколько уменьшились: при  $n = 1,5$   $Q = 2,92$ ; при  $n = 2,5$   $Q = 0,63$ ; при  $n = 3,5$   $Q = 0,09$ .

Рассматривая случай прокатки при  $2\text{tg}\alpha = 0,015$ , определяем, что характер графиков распределения и  $Q$ -фактора и силы прокатки остаются прежними, но значения этих величин несколько изменились (рисунок 6).

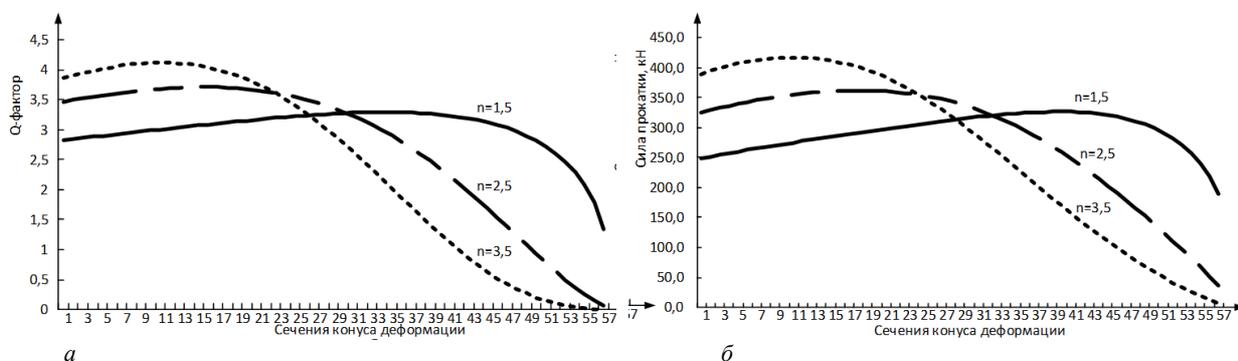


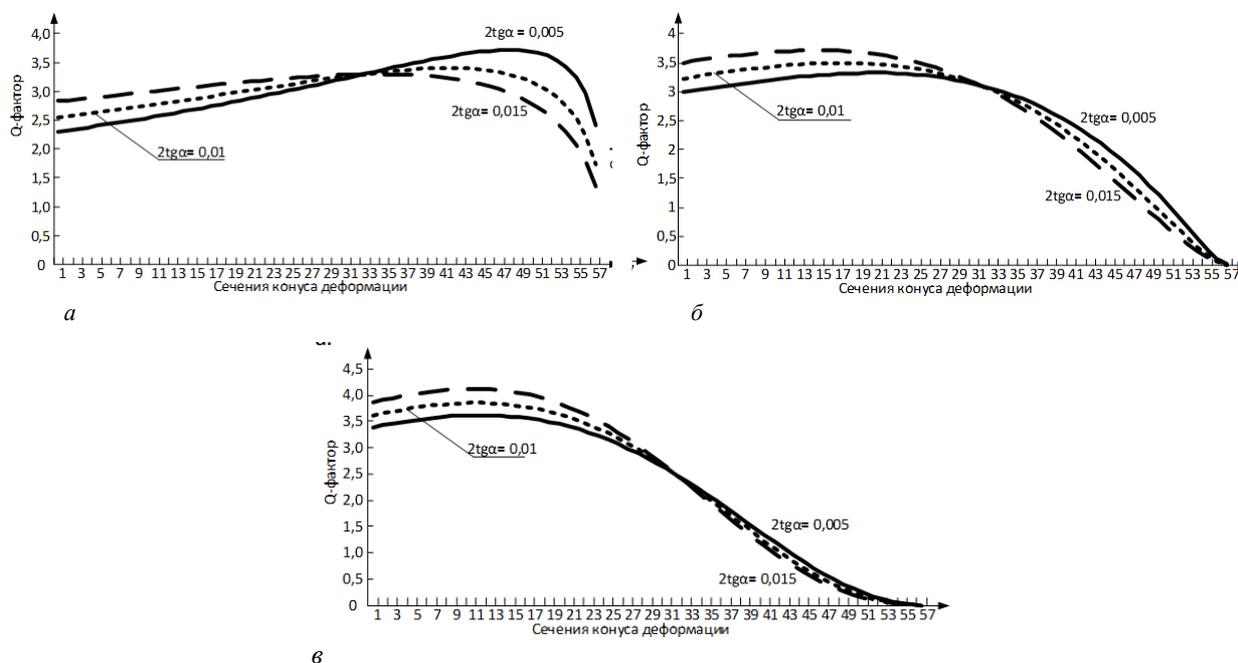
Рисунок 6. – Распределение вдоль конуса деформации  $Q$ -фактора (а) и силы прокатки (б) при  $2\text{tg}\alpha = 0,015$  (сплав Gr-2, ХПТ-55, маршрут – 50, 8x4, 75-38, 1x2, 275,  $m = 5$ )

При  $2\text{tg}\alpha = 0,015$  и  $n = 1,5$  (см. рисунок 6) на графике имеется максимум значения  $Q$ -фактора ( $Q = 3,294$ ) в 36-м сечении. Разница в значениях силы прокатки (в сравнении с  $2\text{tg}\alpha = 0,005$  и  $n = 1,5$ ) меньше одного процента. В 41-м сечении наблюдается максимум силы прокатки в  $P = 326,3$  кН. Распределение  $Q$ -фактора более равномерно, чем в других случаях калибровок при  $n = 1,5$ . Значения  $Q$ -фактора также не падают ниже единицы даже в зоне предотделки. Это показатель того, что вдоль зоны предотделки продолжается процесс обжатия стенки. Следует отметить, что величины обжатий значительно ниже допуска на толщину стенки. Сила прокатки в конце зоны предотделки не падает ниже 190,1 кН – негативный фактор, приводящий к значительным упругим деформациям клетки и валков.

При  $2\text{tg}\alpha = 0,015$  и  $n = 2,5$  (см. рисунок 6)  $Q$ -фактор принимает максимальные значения в 17-м сечении ( $Q = 3,712$ ). В конце конуса деформации  $Q$ -фактор принимает значение  $Q = 0,49$ , что меньше единицы, и дальше его значения снижаются. Разница в значениях силы прокатки незначительна (сравниваем с  $2\text{tg}\alpha = 0,005$  и  $n = 2,5$ ).

При  $2\text{tg}\alpha = 0,015$  и  $n = 3,5$  (см. рисунок 6) максимальные значения  $Q$ -фактора наблюдаются в 12-м сечении ( $Q = 4,12$ ). В конце конуса деформации  $Q$ -фактор принимает значение  $Q = 0,06$  при дальнейшем снижении этого значения. Разница в значениях силы прокатки также незначительна (сравниваем с  $2\text{tg}\alpha = 0,005$  и  $n = 3,5$ ).

В целом степень крутизны ( $n$ ) оказывает большее влияние на характер распределения  $Q$ -фактора вдоль конуса деформации, чем начальная конусность (рисунок 7). То же можно сказать и о силе прокатки.



**a** – при  $n = 1,5$ ; **б** – при  $n = 2,5$ ; **в** – при  $n = 3,5$   
(сплав Gr-2, ХПТ-55, маршрут – 50, 8x4, 75-38, 1x2, 275,  $m = 5$ )

**Рисунок 7. – Распределение  $Q$ -фактора вдоль конуса деформации**

**Заключение.** Анализ влияния степени крутизны ( $n$ ) рабочей зоны оправки и образующей развертки ручья калибра стана холодной прокатки труб на изменение распределения  $Q$ -фактора вдоль конуса деформации показал следующее:

1. Степень крутизны оказывает большее влияние на характер распределения  $Q$ -фактора вдоль конуса деформации, чем начальная конусность.

2. Для прокатки выбранного сортамента труб при значении степени крутизны в  $n = 2,5$  и начальной конусности  $2\text{tg}\alpha = 0,005$  имеется наиболее благоприятное сочетание характеристик распределения  $Q$ -фактора и силы прокатки. Значение  $Q$ -фактора в зоне обжатия стенки не падает ниже единицы. Из-за низкой величины начальной конусности величина редуцирования в зоне предотделки (здесь обжатие по толщине стенки отсутствует) не оказывает значительного негативного воздействия на структуру металла. Сила прокатки в конце зоны предотделки равняется 16,2 кН.

3. При значении степени крутизны в  $n = 2,5$  при всех значениях начальной конусности в конце зоны обжатия  $Q$ -фактор принимает значения намного меньше единицы, что не приемлемо для прокатки выбранного сортамента труб. Распределение силы прокатки наиболее благоприятное, чем во всех случаях применения значений степени крутизны.

4. При значении степени крутизны в  $n = 1,5$  на протяжении всего конуса деформации значение  $Q$ -фактора не падает ниже единицы (даже в зоне предотделки), более того – растет вдоль зоны обжатия по ходу прокатки. Падение значения  $Q$ -фактора в зоне предотделки и около нее незначительно. Сила прокатки имеет недопустимый характер распределения. Ее величина растет вдоль всей зоны обжатия при незначительном падении в зоне предотделки (и перед ней). Даже в конце зоны предотделки сила прокатки принимает значения, которые не позволяют вести прокатку с приемлемой величиной подачи, снижая производительность процесса до минимума.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Abe, H. Method of Evaluating Workability in Cold Pilgering of Zirconium Alloy Tube / H. Abe, M. Furugen // Materials Transactions. – 2010. – Vol. 51, No. 7. – P. 1200–1205.

2. Филяева, Е.А. Технологические особенности изготовления труб из титановых сплавов / Е.А. Филяева, Я.И. Космацкий // Вестн. ЮУрГУ. Сер. Metallurgy. – 2017. – № 2. – С. 70–76.
3. Мищенко, А.В. Состояние и тенденции развития производства холоднокатаных труб из сплавов на основе титана / А.В. Мищенко // Металл и литье Украины. – 2019. – № 3–4 (310–311). – С. 58–68.
4. Houghon, A.C. Aspects of texture control with Ti-3Al-2.5V seamless cold worked aircraft hydraulic tube / A.C. Houghon, A.W. Bowen // Ironmaking and Steel making. – 1995. – No. 1. – С. 68–70.
5. Balakin, V.F. Influence of the parameters of the process of the cold pilger tube rolling on the  $Q$ -factor distribution along the cone of deformation / V.F. Balakin, S.V. Pilipenko // Itatube-journal. – 2016. – No. 1. – С. 94–97.
6. Текстурные характеристики опытной партии твэльных труб из сплава КТЦ-110 / В.М. Ажажа [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. – 2000. – № 2. – С. 86–93.
7. Пилипенко, С.В. Исследование влияния параметров процесса ХПТ на распределение  $Q$ -фактора вдоль конуса деформации / С.В. Пилипенко // Инновационные технологии в машиностроении : материалы науч.-техн. конф. с междунар. участием, Новополоцк, 19–20 апр. 2018 г. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2018. – С. 247–251.
8. Технология изготовления изделий из циркониевых сплавов для атомной энергетики и некоторые свойства сплавов циркония. Обзор / В.М. Ажажа [и др.]. – Харьков : ИФТТ МТ ННЦ ХФТИ, 1999.
9. Компьютерное моделирование процесса холодной прокатки циркониевых труб-оболочек ТВЕЛ / Г.В. Вольфович [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. – 2015. – № 3. – С. 89–91.
10. Propagation of surface defects at cold pilger rolling of tubes and pipes / I. Frolov [et al.] // Metallurgical and Mining Industry. – 2018. – No. 9. – P. 72–79.
11. Schulze, H.D. Propagation of circumferential and longitudinal cracks in straight pipes and pipe bends / H.D. Schulze, G. Togler, E. Bodmann // Nuclear engineering and design. – 1980. – No. 58. – P. 19–31.
12. Krishna Aditya Y. V. Complexity of pilgering in nuclear applications / Krishna Aditya Y. V. // Journal of Engineering Research and Applications. – 2014. – Vol. 4, No. 11. – P. 41–46.
13. Frolov, I. The heat conditions of the cold pilger rolling / I. Frolov, I. Mamuzić, V.N. Danchenko // Metalurgija – Sisak then Zagreb. – 2006. – No. 45(3). – P. 179–184.
14. Григоренко, В.У. Розвиток методу розрахунку параметрів процесу холодної пильгерної прокатки труб і калібровки інструмента / В.У. Григоренко, С.В. Пилипенко, А.П. Головченко. – Дніпропетровськ : Пороги. – 2015. – 120 с.
15. Пилипенко, С.В. Анализ влияния технологических факторов процесса холодной прокатки труб на изменение распределения  $Q$ -фактора вдоль конуса деформации / С.В. Пилипенко // Изв. высш. учеб. заведений. Цветная металлургия. – 2019. – № 3. – С. 33–35.
16. Пилипенко, С.В. Развитие метода расчета параметров процесса холодной прокатки труб на станах ХПТ с использованием линий Безье / С.В. Пилипенко, В.У. Григоренко, И.В. Маркевич // Теория и практика металлургии. – 2012. – № 3. – С. 28–30.
17. Пилипенко, С.В. Развитие метода расчета параметров процесса холодной прокатки труб на станах ХПТ и ХПТР с использованием линий Безье при разработке продольного профиля рабочего конуса деформации / С.В. Пилипенко, В.У. Григоренко // Системные технологии. – 2011. – № 4. – С. 35–40.
18. Шевакин, Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб / Ю.Ф. Шевакин. – М. : Металлургиздат, 1963. – 269 с.
19. Фролов, В.Ф. Холодная пильгерная прокатка труб / В.Ф. Фролов, В.Н. Данченко, Я.В. Фролов. – Днепропетровск : Пороги, 2005. – 260 с.

Поступила 10.06.2020

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SEPARATE CALIBRATION PARAMETERS OF THE WORKING TOOL OF THE COLD ROLLING PIPES MILLS ON THE $Q$ -FACTOR DISTRIBUTION ALONG THE DEFORMATION CONE

S. PILIPENKO

*The study is intended to analyze the effect such technological factors of the cold pipe rolling process as the initial conicity and steepness of the mandrel working profile, the fluctuations of wall thickness accuracy, the influence of mandrel repositions on the changing of  $Q$ -factor distribution along the deformation cone. The  $Q$ -factor value, which is the relationship between real deformation of wall thickness and real deformation of the pipe mean diameter, and its distribution pattern along the deformation cone are controlled values in the proses of rolling pipes from titanium and zirconium alloys of a certain assortment. The  $Q$ -factor defines if metal grains will oriented radially or tangentially. It's desirable that  $Q$ -factor fluctuate insignificantly about its definite value and deformation cone. It was found that the degree of steepness has a greater effect on the nature of the distribution of the  $Q$ -factor along the deformation cone than the initial conicity. The most optimal values of the degree of steepness and initial taper were found (from the point of view of the distribution of the  $Q$ -factor and rolling force along the deformation zone).*

**Keywords:** CTR mill, optimal distribution,  $Q$ -factor, deformation force, calibration parameters.