

УДК 621.774

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ Q -ФАКТОРА
В КОНТРОЛЬНЫХ СЕЧЕНИЯХ КОНУСА ДЕФОРМАЦИИ СТАНА
ХОЛОДНОЙ ПИЛЬГЕРНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ**

*канд. техн. наук, доц. С.В. ПИЛИПЕНКО
(Полоцкий государственный университет),
д-р техн. наук, проф. В.У. ГРИГОРЕНКО*

(Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Днепр)

Исследуется влияние метода расчета начальных значений геометрических параметров конуса деформации на точность определения характера распределения Q -фактора вдоль конуса деформации стана ХПТ как важного фактора, создающего необходимые условия деформации, обеспечивающие образование требуемой текстуры труб из сплава Ti-3Al-2.5V. Методы исследований базировались на существующей зависимости, описывающей влияние истинных обжатий сечения вдоль конуса деформации на величину Q -фактора в этом сечении, а также ряда зависимостей, выведенных разными авторами для определения начальных значений геометрических параметров произвольного сечения конуса деформации перед двойным ходом клетки стана ХПТ. В рамках этого предложен свой, «прямой», метод определения начальных значений геометрических параметров произвольного сечения конуса деформации, базирующийся на интерполяции данных калибровки инструмента стана ХПТ. Алгоритм «прямого» метода расчета начальных значений геометрических параметров конуса деформации позволяет с большей точностью определять как эти величины, так и точность значения Q -фактора при применении других методов (по формулам Я.Е. Осады, Б.М. Рогова и упрощенной формуле определения величины редуцирования) определения рассматриваемых деформационных параметров для расчета величины Q -фактора.

Ключевые слова: *холоднокатаные трубы, титановый сплав Ti-3Al-2.5V, тип текстуры, холодная пильгерная валковая прокатка труб, геометрические характеристики сечения, обжатие вдоль конуса деформации, Q -фактор.*

Введение. Современная технология холодной прокатки труб из титановых сплавов типа Ti-3Al-2.5V, используемых в гидросистемах самолетов и других ответственных элементах машин и механизмов, предполагает получение продукции с определенной ориентацией зерен [1–3]. Требования к виду текстуры материала такого вида трубной продукции и методики определения наличия нужной текстуры строго регламентированы стандартами и требуют беспрекословного выполнения. Производители вынуждены проводить ряд мероприятий по обеспечению наличия необходимых режимов деформационной и термической обработки труб в ходе переделов холодной прокатки [3–6].

Готовая трубная продукция такого вида должна иметь так называемую радиальную текстуру, которая обеспечивает [1–4]:

- повышение усталостной прочности;
- повышение пластичности при данной величине предела прочности;
- повышение предела текучести;
- более высокую вязкость.

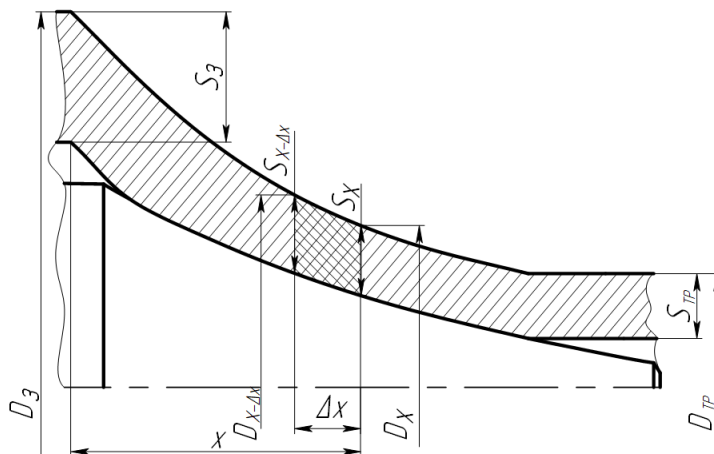
Таким образом можно обеспечить необходимые технологические характеристики трубопроводов при их меньшем удельном весе. В самолето- и ракетостроении данный фактор является очень чувствительным. Ti-3Al-2.5V – это α -титан [5–9] с гексагональной плотноупакованной решеткой. В отличие от сплавов с β -структурой он менее пластичен [3]. Однако именно наличие анизотропии свойств, в зависимости от ориентации плоскостей ГПУ-кристалла, позволяет удовлетворять эти сложные требования к готовым трубным изделиям [2; 3].

Одним из основных параметров, контролируемых в ходе холодной прокатки такого вида труб, является так называемый Q -фактор [2; 3]. Его величина контролируется расчетно как вдоль конуса деформации в каждом проходе, так и из прохода в проход. Это требует не только дополнительных усилий, но и повышения точности расчетов параметров, связанных с определением величины Q -фактора.

Цель данной работы – исследование влияния метода расчета геометрических параметров контрольного сечения конуса деформации до его деформации за двойной ход клетки на точность определения величины Q -фактора в контрольных сечениях конуса деформации для контроля создаваемого распределения величины Q -фактора для получения качественной трубной продукции условий деформации.

Методология. Если рассмотреть сечение, которое отстоит от начала конуса деформации на расстоянии x (рисунок 1), то величину Q -фактора в этом сечении можно определить из зависимости [1–4]

$$Q = \frac{\ln \frac{S_x}{S_{x-\Delta x}}}{\ln \frac{D_x - S_x}{D_{x-\Delta x} - S_{x-\Delta x}}} \quad (1)$$



D_x и S_x – геометрические параметры рассматриваемого сечения после деформации двойным ходом клетки;
 $D_{x-\Delta x}$ и $S_{x-\Delta x}$ – геометрические параметры рассматриваемого сечения до деформации двойным ходом клетки;
 Δx – смещение рассматриваемого сечения за двойной ход клетки

Рисунок 1. – Схема к определению $D_{x-\Delta x}$ и $S_{x-\Delta x}$ в произвольно выбранном сечении конуса деформации стана холодной пильгерной валковой прокатки труб

Из формулы (1) и рисунка 1 видно, что ряд исходных величин, необходимых для проведения расчета, можно условно разделить на три группы:

1) одни из них заданы, их величина и отклонение этих параметров от среднего значения заранее известны:

– S_{mp} – толщина стенки готовой трубы после каждого прохода в маршруте прокатки и допуски на ее точность;

– D_{mp} – диаметр готовой трубы после каждого прохода в маршруте прокатки и допуски на его точность;

– S_3 – толщина стенки трубы-заготовки перед каждым проходом и допуски на ее точность;

– D_3 – диаметр трубы-заготовки перед каждым проходом и допуски на его точность;

2) часть исходных величин берут из рассчитанной калибровки и с их определением не возникает сложностей:

– S_x – толщина стенки в контрольном сечении конуса деформации после двойного хода клетки;

– D_x – диаметр конуса деформации в контрольном сечении конуса деформации после двойного хода клетки;

3) следующие величины можно рассчитать несколькими способами, имеющими ту или иную точность:

– $S_{x-\Delta x}$ – толщина стенки контрольного сечения конуса деформации до ее деформации за двойной ход клетки;

– $D_{x-\Delta x}$ – диаметр контрольного сечения конуса деформации до его деформации за двойной ход клетки.

При определении $D_{x-\Delta x}$ и $S_{x-\Delta x}$ (см. рисунок 1) исходными величинами, как правило, являются:

– m – подача трубы перед двойным ходом клетки;

– $\mu_{\Sigma x}$ – вытяжка трубы вдоль конуса деформации;

– $\operatorname{tg} \gamma = \frac{D_{x-1} - D_x}{2L_{x-1+x}}$ – конусность калибра на рассматриваемом участке;

– $\operatorname{tg} \alpha = \frac{d_{x-1} - d_x}{2L_{x-1+x}}$ – конусность оправки на рассматриваемом участке.

Известно, что при обжатии каждого сечения конуса деформации за двойной ход клетки данное сечение смещается вдоль конуса на величину Δx , которую можно определить, либо используя формулу Я.Е. Осады [2; 10–12]

$$\Delta x_x = \frac{\sqrt{S_x^2 + 2 \sqrt{(\operatorname{tg}\gamma - \operatorname{tg}\alpha) \frac{mS_3(S_3 - D_3)}{D_x - S_x}} - S_x}}{\operatorname{tg}\gamma - \operatorname{tg}\alpha} \quad (2)$$

либо из упрощенного выражения

$$\Delta x_x = m\mu_{\Sigma x} \quad (3)$$

Толщину стенки контрольного сечения конуса деформации до ее деформации за двойной ход клетки $S_{x-\Delta x}$ можно определить, используя либо формулу Я.Е. Осады, выведенную из формулы (2),

$$\Delta S_{x-\Delta x} = \sqrt{S_x^2 + 2 \cdot \frac{mS_3(S_3 - D_3)}{D_x - S_x} (\operatorname{tg}\gamma - \operatorname{tg}\alpha)} - S_x, \quad (4)$$

либо формулу Б.М. Рогова, выведенную из упрощенной формулы (3) [9],

$$\Delta S_{x-\Delta x} = m\mu_{\Sigma x} (\operatorname{tg}\gamma - \operatorname{tg}\alpha), \quad (5)$$

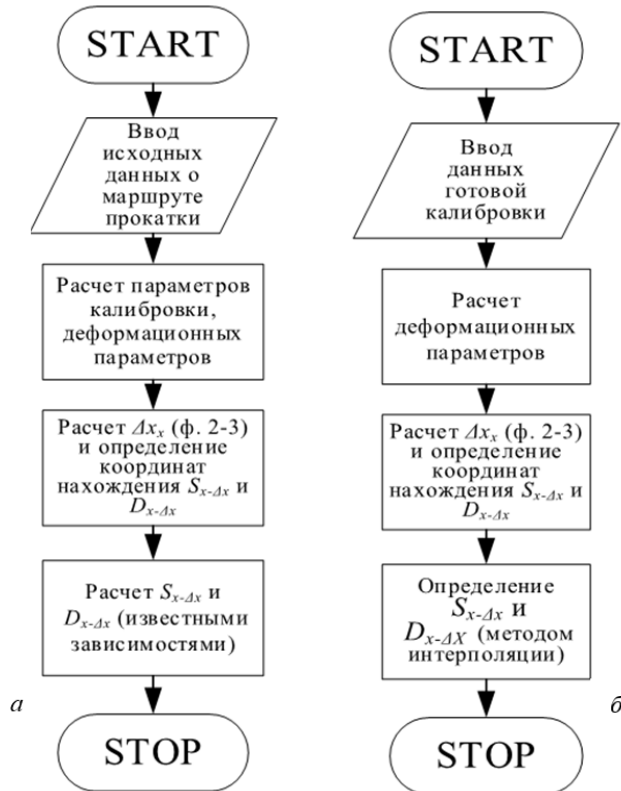
где $\mu_{\Sigma x} = \frac{F_3}{F_x}$.

Известно, что формулы Я.Е. Осады (2) и (4) дают более точные результаты расчетов, чем формула (3) и формула Б.М. Рогова (5) [2; 10–12]. Для расчета $D_{x-\Delta x}$ можно использовать формулу [10]

$$D_{x-\Delta x} = D_x + 2m\mu_{\Sigma x} \operatorname{tg}\gamma. \quad (6)$$

Данная формула выведена из определения Δx по формуле (3).

Формулы (4)–(6) выведены с определенными допущениями, поэтому авторами статьи предлагается «прямой», более точный, метод определения величины $D_{x-\Delta x}$ и $S_{x-\Delta x}$ (рисунок 2).



a – во время расчета калибровки или при известной методике расчета калибровки;
б – по готовым данным калибровки, рассчитанной по неизвестным зависимостям

Рисунок 2. – Алгоритм определения $D_{x-\Delta x}$ и $S_{x-\Delta x}$

Данный метод имел положительную практику использования в ходе расчета калибровок промышленных партий труб из титановых сплавов с заранее заданным распределением Q -фактора вдоль конуса деформации.

При расчете Δx в сечениях конуса деформации на практике предлагается использовать формулу (2), т.к. точность определения величины Δx по данной формуле более высокая, чем у формулы (3) [2]. Опыт авторов в расчетах калибровок станов холодной прокатки труб доказывает, что оба указанных на рисунке 2 алгоритма дают сопоставимые по точности результаты.

Исходя из вышеприведенного, значения $S_{x-\Delta x}$ можно рассчитать следующими способами:

- $S_{x-\Delta x}$ (ф. 4) – определение $S_{x-\Delta x}$ по формуле (4);
- $S_{x-\Delta x}$ (ф. 5) – определение $S_{x-\Delta x}$ по формуле (5);
- $S_{x-\Delta x}$ (рис. 2, ф. 2) – определение $S_{x-\Delta x}$ методом прямого расчета (см. рисунок 2) с определением Δx по формуле Я.Е. Осады (формула (2));
- $S_{x-\Delta x}$ (рис. 2, ф. 3) – определение $S_{x-\Delta x}$ методом прямого расчета (см. рисунок 2) с определением Δx по формуле (3).

Значения $D_{x-\Delta x}$:

- $D_{x-\Delta x}$ (ф. 6) – определение $D_{x-\Delta x}$ по формуле (6);
- $D_{x-\Delta x}$ (рис. 2, ф. 2) – определение $D_{x-\Delta x}$ методом прямого расчета (см. рисунок 2) с определением Δx по формуле Я.Е. Осады (формула (2));
- $D_{x-\Delta x}$ (рис. 2, ф. 3) – определение $D_{x-\Delta x}$ методом прямого расчета (см. рисунок 2) с определением Δx по формуле (3).

Поскольку формула (2) определяет величину Δx в сечениях конуса деформации с большей точностью [2], а при определении величин $D_{x-\Delta x}$ и $S_{x-\Delta x}$ «прямым» методом отсутствуют упрощения, принятые при выведении формул (5) и (6), то при дальнейшем анализе основой для сравнения точности расчетов $D_{x-\Delta x}$ и $S_{x-\Delta x}$ принимается следующее:

- $S_{x-\Delta x}$ (рис. 2, ф. 2) – определяем $S_{x-\Delta x}$ методом прямого расчета (см. рисунок 2, а), для расчета Δx используем формулу Я.Е. Осады (формула (2));
- $D_{x-\Delta x}$ (рис. 2, ф. 2) – определяем $D_{x-\Delta x}$ методом прямого расчета (см. рисунок 2, а), для расчета Δx используем формулу Я.Е. Осады (формула (2)).

Для расчетов выбран маршрут прокатки труб из титанового сплава Ti-3Al-2.5V на стане ХПТ-55: 41x4,4 – 23x1,95 мм. Q -фактор за проход $Q = 1,471$; относительное обжатие по площади поперечного сечения $\varepsilon_F = 74,51\%$; относительное обжатие по толщине стенки $\varepsilon_S = 55,68\%$; относительное обжатие по внешнему диаметру $\varepsilon_D = 43,9\%$; вытяжка за проход $\mu_\Sigma = 3,92$. Расчетная величина подачи $m = 7$ мм.

На рисунке 3 показаны результаты анализа точности выбранных методов расчета толщины стенки в контрольных сечениях конуса деформации до ее деформации за двойной ход клетки ($S_{x-\Delta x}$). Сравнения показаны в относительных единицах разбега точности определения $S_{x-\Delta x}$.

Согласно графику (см. рисунок 3, а), если производить расчет величины $S_{x-\Delta x}$ «прямым» методом по алгоритму, указанному на рисунке 2, а, но с определением величины Δx по формуле (3), то получим увеличенные значения $S_{x-\Delta x}$ во всех сечениях зоны обжатия конуса деформации в сравнении с величиной $S_{x-\Delta x}$, рассчитанной тем же методом, но с определением Δx по формуле Я.Е. Осады (2). Однако наблюдаемое увеличение значений $S_{x-\Delta x}$ гораздо меньше одного процента.

Если производить расчет величины $S_{x-\Delta x}$ по формуле Б.М. Рогова (формула (5)) (см. рисунок 3, б), то разница со сравниваемым методом колеблется в границах от $-0,1$ до $2,67\%$. Рассчитывая $S_{x-\Delta x}$ по формуле Я.Е. Осады (формула (4)), мы снова имеем колебание разницы значений, лежащих в пределах $\pm 1\%$.

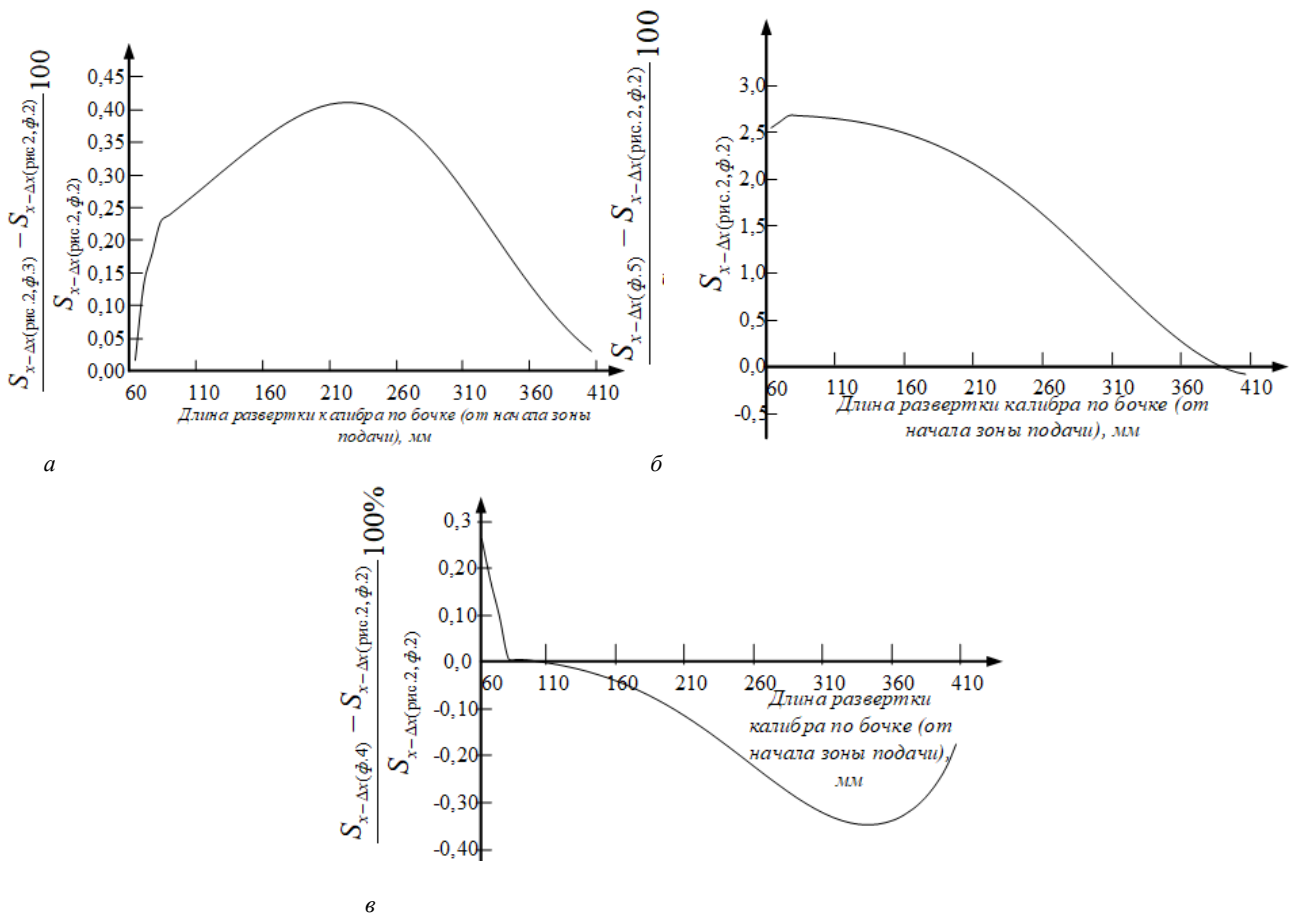
На рисунке 4 показаны графики изменения ΔD_x , рассчитанной «прямым» методом согласно алгоритму, указанному на рисунке 2, б, с определением Δx по формулам (2) и (3) и результатов расчета ΔD_x при $D_{x-\Delta x}$, найденной по формуле (6).

При расчете ΔD_x «прямым» методом согласно алгоритму, указанному на рисунке 2, а, определение Δx как по формуле (2), так и по формуле (3) не приводит к значительной разнице итоговых значений ΔD_x . Несмотря на то, что ΔD_x по формуле (6) показал меньшие значения, в целом можно считать, что точность этих методов сравнима и достаточна для такого вида расчетов.

Таким образом, имеются следующие методы определения величины Q -фактора (рисунок 5):

- определение $S_{x-\Delta x}$ по формуле (4), а определение $D_{x-\Delta x}$ по формуле (6);
- определение $S_{x-\Delta x}$ по формуле (4), а определение $D_{x-\Delta x}$ «прямым» методом (с определением Δx по одной из двух вышеуказанных формул);
- определение $S_{x-\Delta x}$ по формуле (5), а определение $D_{x-\Delta x}$ по формуле (6);
- определение $S_{x-\Delta x}$ по формуле (5), а определение $D_{x-\Delta x}$ «прямым» методом (с определением Δx по одной из двух вышеуказанных формул);

– определение и $D_{x-\Delta x}$ и $S_{x-\Delta x}$ «прямым» методом (с определением Δx по одной из двух указанных формул).



а – определение величины $S_{x-\Delta x}$ «прямым» методом расчета (см. рисунок 2, **а**), но с определением Δx по формуле (3);
б – определение величины $S_{x-\Delta x}$ по формуле Б.М. Рогова (формула (5));
в – определение величины $S_{x-\Delta x}$ по формуле Я.Е. Осады (формула (4))

Рисунок 3. – Разбег значений $S_{x-\Delta x}$ в сравнении с $S_{x-\Delta x}$, рассчитанной «прямым» методом расчета (см. рисунок 2, **а**) с определением Δx по формуле (2)

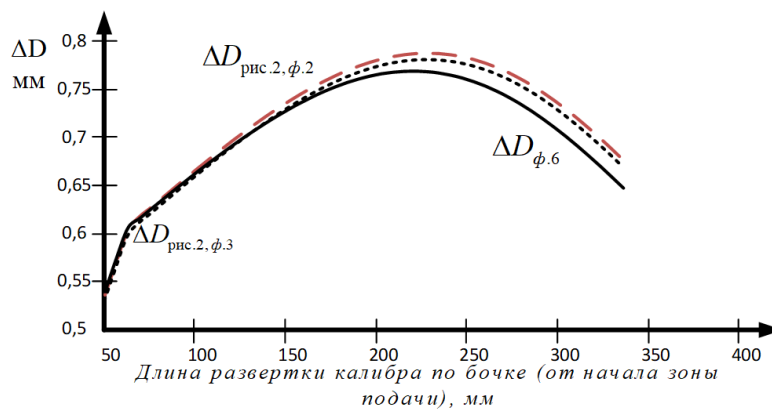


Рисунок 4. – Результаты расчетов распределение $\Delta D_{x-\Delta x}$ вдоль конуса деформации

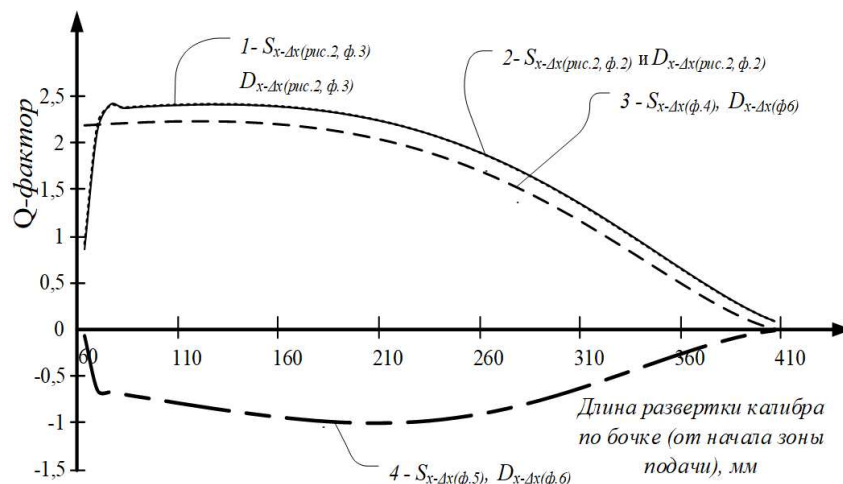


Рисунок 5. – Распределение Q -фактора вдоль конуса деформации, рассчитанное различными способами определения $S_{x-\Delta x}$ и $D_{x-\Delta x}$

Как видно из рисунка 5, при расчете $D_{x-\Delta x}$ и $S_{x-\Delta x}$ «прямым» методом, как с определением Δx по формуле (2) (кривая 2, см. рисунок 5), так и по формуле (3) (кривая 1, см. рисунок 5), кривые полученных значений Q -фактора практически сливаются (с разбегом значений гораздо меньше одного процента).

Определяя значения $D_{x-\Delta x}$ по формуле (6), а $S_{x-\Delta x}$ по формуле Я.Е. Осады (4), получаем более низкие (в основном) значения Q -фактора. Отклонение значений от кривой 2 составляет от -8 до -67% (исключая первые сечения зоны обжатия, где разница достигает $+152\%$).

Определение значений $D_{x-\Delta x}$ по формуле (6), $S_{x-\Delta x}$ по формуле Б.М. Рогова (5) в итоге выдает совершенно неадекватные значения Q -фактора.

На рисунке 6 (кривая 1) сделано сравнение еще одного метода расчета величины Q -фактора (с расчетом $S_{x-\Delta x}$ по формуле Я.Е. Осады (4), а $D_{x-\Delta x}$ «прямым» методом с определением Δx по формуле (2)) с кривыми распределения Q -фактора 2 и 3 (см. рисунок 5). В начале зоны обжатия (за исключением первых 2-х сечений) кривая 1 совпадает с кривой 2, затем по мере уменьшения доли величины обжатия по толщине стенки в сравнении с величиной редуцирования кривая 1 плавно переходит в кривую 2 (рисунок 6).

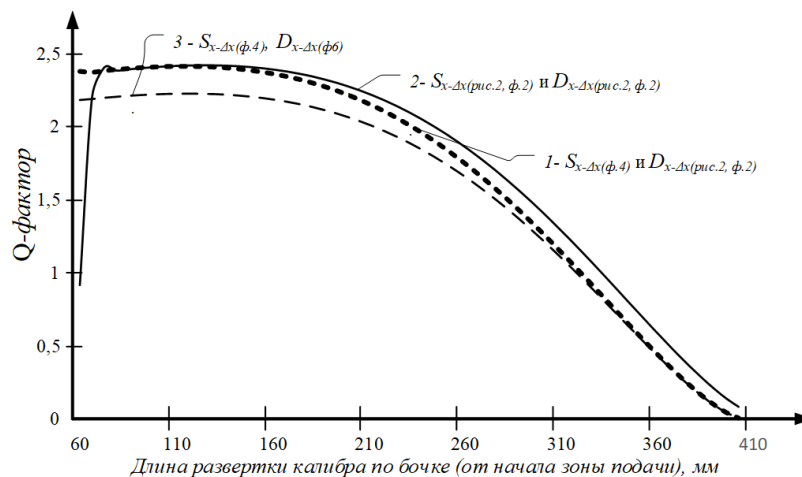


Рисунок 6. – Сравнение кривой распределение Q -фактора с расчетом $S_{x-\Delta x}$ по формуле Я.Е. Осады (формула (4)), а $D_{x-\Delta x}$ «прямым» методом, с определением Δx по формуле (2), с кривыми 2 и 3 (см. рисунок 5)

Заключение:

1. Выявлено, что выбор неверного метода расчета начальных значений величин толщины стенки и диаметра сечения конуса деформации ($S_{x-\Delta x}$ и $D_{x-\Delta x}$) может привести к значительным ошибкам при расчете характера распределения Q -фактора вдоль конуса деформации стана ХПТ.

2. Расчет Q -фактора «прямым» методом и методом с применением формулы Я.Е. Осады (4) коррелируются по результатам расчетов. При этом «прямой» метод расчетов показал повышенные результаты Q -фактора во всех сечениях конуса деформации в сравнении со случаями использования формулы (4).

3. Формула Б.М. Рогова для определения $S_{x-\Delta x}$ наименее точна, поэтому рассчитанные значения Q -фактора в сечениях конуса деформации в значительной мере отличаются как от результатов расчетов по формуле А.Е. Осады (4), так и от результатов расчетов, полученных «прямым» методом.

4. Использование «прямого» метода расчета $S_{x-\Delta x}$ и $D_{x-\Delta x}$ позволяет практически нивелировать неточность определения величины Δx по формуле (3), однако использование в расчетах формулы (2) более предпочтительно.

5. Использование упрощенной формулы (6) для определения $D_{x-\Delta x}$ приводит к уменьшению точности полученных результатов, и ее рекомендуется использовать только с формулой А.Е. Осады (4).

6. В целом при определении распределения Q -фактора вдоль конуса деформации стана ХПТ для расчета $S_{x-\Delta x}$ и $D_{x-\Delta x}$ предлагается использовать приведенный алгоритм «прямого» метода расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pilipenko, S.V. Deformation mode in a cold rolling condition to provide the necessary texture of the Ti-3Al-2.5V alloy / S.V. Pilipenko, V.U. Grigorenko, O.O. Bohdanov // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2021. – № 1. – С. 78–83. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/078>.
2. Пилипенко, С.В. Исследование точности определения обжатия по толщине стенки вдоль конуса деформации за двойной ход клетки станов ХПТ / С.В. Пилипенко // Сталь. – 2017. – № 2. – С. 94–97.
3. 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. Цв. металлургия. – 2019. – № 3. – С. 30–35.
4. Определение технологической возможности изготовления нового вида бесшовных труб TrEx из титанового сплава Ti-3Al-2.5V / Я.И. Космацкий [и др.] // Качество в обработке материалов. – 2016. – № 2 (6). – С. 15–22.
5. Rui, L. Quasi-Static and Dynamic Properties of Ti-3Al-2.5V Titanium Alloy Tubes. / Liu Rui, Li Yang // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – V. 381. – P. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899X/381/1/012167.
6. Texture Development of Ti-3Al-2.5V Titanium Alloy Tubes / Z. Li [et al.] // Rare Metal Materials and Engineering. – 2017. – V. 46. – P. 233–239. DOI: 3169-3175. 10.1016/S1875-5372(18)30023-7.
7. Influence of texture on mechanical properties of titanium alloy tubes / V. Vakhrusheva [et al.] // Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals. – 2019. – V. 844. – P. 182–187. DOI: 10.30838/J.PMHTM.2413.241219.16.596.
8. Texture evolution and controlling of high-strength titanium alloy tube in cold pilgering for properties tailoring / H. Li [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2019. – V. 279. – P. 116520. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116520.
9. Мищенко, А.В. Состояние и тенденции развития производства холоднокатанных труб из сплавов на основе титана / А.В. Мищенко // Металл и литье Украины. – 2019. – № 3-4. – С. 310–311.
10. Grigorenko, V.U. Variation in wall thickness of cold-rolled pipe / V.U. Grigorenko, S.V. Pilipenko // Steel in Translation. – 2008. – 38 (9). – P. 775–776. DOI: 10.3103/S0967091208090209.
11. Шевакин, Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб / Ю.Ф. Шевакин. – М. : Металлургия, 1963. – 212 с.
12. Геометрия прокатного инструмента и алгоритмы его расчета для станов холодной прокатки труб / В.Ф. Балакин [и др.] // Совершенствование производства стали, труб и железнодорожных колес // под ред. А.Г. Величко, В.И. Большакова, В.Ф. Балакина. – Днепропетровск : Экономика, 2015. – С. 434–450.

Поступила 20.04.2021

INCREASING THE ACCURACY OF DETERMINING THE Q-FACTOR IN CONTROL SECTIONS OF THE STAN DEFORMATION CONE COLD PILGER ROLLING PIPE

S. PILIPENKO, V. GRIGORENKO

The influence of the method for calculating the initial values of the geometric parameters of the deformation cone on the accuracy of determining the nature of the distribution of the Q -factor along the deformation cone of the cold rolling mill is investigated as an important factor that creates the necessary deformation conditions that ensure the formation of the required texture of pipes made of Ti-3Al-2.5V alloy. The research methods were based on the existing dependence describing the effect of true cross-section compressions along the deformation cone on the value Q -factor in this section, as well as a number of dependencies, derived by different authors to determine the initial values of the geometric parameters of an arbitrary section of the deformation cone before the double stroke of the stand of the KhPT mill. Within the framework of this, a “direct” method of determining the initial values of the geometric parameters of an arbitrary section of the deformation cone, based on the interpolation of the calibration data of the tool of the cold rolling mill, has been proposed. The algorithm of the “direct” method for calculating the initial values of the geometric parameters of the deformation cone makes it possible to more accurately determine both these values and the accuracy of the Q -factor when using other methods (according to the formulas of Ya.E. Osada, B.M. Rogov and a simplified formula for determining the amount of reduction) for determining the considered deformation parameters for calculating the value of the Q -factor.

Keywords: cold-rolled pipes, titanium alloy Ti-3Al-2.5V, texture type, cold pilger roll rolling of pipes, geometric characteristics of the section, compression along the deformation cone, Q -factor.