



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-81-87>
УДК 621.774

Поступила 12.07.2023
Received 12.07.2023

ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПОДАЧИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ Q-ФАКТОРА ВДОЛЬ КОНУСА ДЕФОРМАЦИИ СТАНА ТИПА ХПТ

В. А. ТОМИЛО, Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: stamila@rambler.ru

С. В. ПИЛИПЕНКО, Полоцкий государственный университет,

г. Новополоцк, Витебская обл., Беларусь, ул. Блохина, 29. E-mail: 44-08@mail.ru

Чтобы обеспечить образование микроструктуры труб из титановых сплавов типа Ti-3Al-2.5V, необходимо их деформировать при соблюдении определенных, строгих, условий. Такие условия деформации возможно создать только в станах холодной пильгерной прокатки труб (ХПТ). Только эти станы обеспечивают необходимое распределение Q-фактора вдоль рабочего конуса каждого отдельного прохода прокатки. На характер распределения Q-фактора вдоль рабочего конуса стана типа ХПТ влияет множество факторов. Целью данной работы является определение влияния величины подачи на распределение Q-фактора между прямым и обратным ходами клетки. Выбирались различные способы ведения процесса ХПТ с точки зрения осуществления подачи и поворота заготовки. Методы исследования базируются на известных зависимостях, описывающих влияние различных параметров деформации на распределение величины Q-фактора по контрольным сечениям конуса. В работе также рассмотрены особенности деформирования трубы в такой зоне рабочего конуса, как зона предотделки.

Ключевые слова. Трубы бесшовные, титановый сплав, холодная пильгерная прокатка, калибровка, величина подачи, Q-фактор.

Для цитирования. Томило, В. А. Влияние величины подачи на распределение Q-фактора вдоль конуса деформации стана типа ХПТ / В. А. Томило, С. В. Пилипенко // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 81-87. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-81-87>.

INFLUENCE OF THE FEED RATE VALUE ON THE DISTRIBUTION OF THE Q-FACTOR ALONG THE CONE OF DEFORMATION OF A CPR MIL

V. A. TOMILO, Belarusian National Technical University,

Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosty ave. E-mail: stamila@rambler.ru

S. V. PILIPENKO, Polotsk State University, Novopolotsk, Vitebsk region, Belarus, 29, Blokhin str.

E-mail: 44-08@mail.ru

To ensure the formation of the necessary microstructure of pipes made of titanium alloys of the Ti-3Al-2.5V type, when they are deformed at cold pilger rolling mills, it is necessary to provide certain deformation conditions. In particular, the deformation modes are distributed in such a way as to obtain the necessary Q-factor distribution along the deformation cone. The purpose of this work is to determine the effect of the feed value on the Q-factor distribution along the deformation zone during forward and reverse movements of the roll mill stand. Various methods of carrying out the CPT process were chosen in terms of feeding and rotating the workpiece during the double stroke of the roll mill stand. The research methods are based on known dependencies describing the effect of true deformations in the sections of the working cone on the Q-factor in these control sections. Calibration using a mandrel with a curved shape of the working surface was chosen for the analysis. 1 Calculations were made for the case of feeding rate before the forward stroke, turning before the reverse, as well as for the case of feeding and turning in both positions of the roll mill stand. The case of mismatch of the feed size is considered, when the feed before the reverse stroke is larger than before the direct one. The methods of leveling the influence of pipe deformation features in the wall calibration zone on the formation of the necessary microstructure of pipes made of Ti-3Al-2.5V alloys are proposed.

Keywords. Seamless pipes, titanium alloy, cold pilger rolling, calibration, calibers and mandrels, feed rate, Q-Factor.

For citation. Tomilo V. A., Pilipenko S. V. Influence of the feed rate value on the distribution of the Q-factor along the cone of deformation of a CPR mil. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 81-87. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-81-87>.

Введение

К трубам из титановых и циркониевых сплавов, используемых в аэрокосмической отрасли, предъявляются ряд требований по обеспечению точности геометрических параметров, микроструктуре, чистоте

наружной и внутренней поверхностей и др. Большинство этих требований обеспечиваются процессом холодной пильгерной прокатки как на станах ХПТ, так и на станах ХПТР [1, 2]. Данные станы являются высокоманевренными и позволяют прокатывать малые партии труб при обеспечении экономической выгоды для трубопроизводителя [3]. Один из перспективных сплавов – титановый сплав Ti-3Al-2.5V [4, 5]. В данном сплаве при комнатных температурах в микроструктуре наблюдается преимущество α -фазы, имеющей ГПУ решетку [1, 4, 5]. При изменении ориентации зерен такого сплава возможно (в значительной мере) изменять технологические свойства готовых труб. Например, если использовать такие трубы в гидравлических системах, то можно уменьшить толщину их стенки [3–5]. Масса таких трубопроводов уменьшится, а технологические характеристики останутся прежними.

Анализ исследований

На рис. 1 показана схема процесса деформации трубы в стане ХПТ. Особенность стана в том, что не металл трубы движется относительно деформационной клетки стана, а клетка вдоль неподвижно закрепленного конуса деформации. В конус деформации перед каждым деформационным проходом клетки задается участок заготовки определенной длины (объем подачи). После деформационного прохода совершается поворот трубы для раскатки утолщений в выпусках. При возвратно-поступательном движении клетки через ведущую шестерню валки катятся по шестеренной рейке. Таким образом организован привод вращения валков [3].

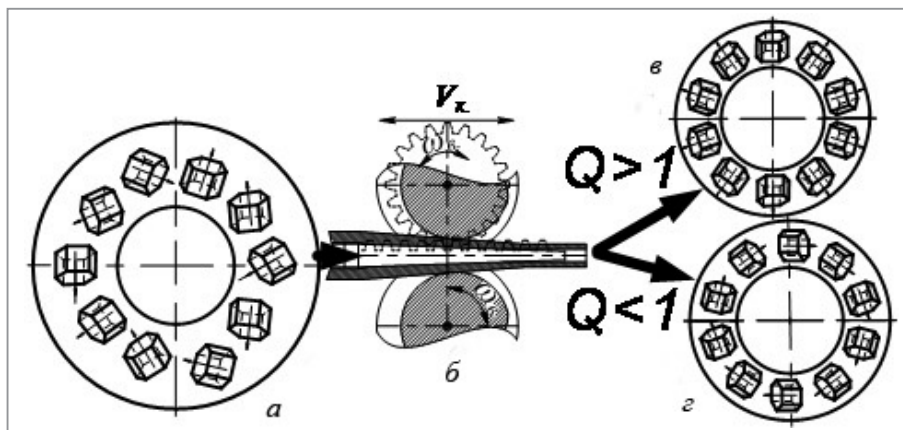


Рис. 1. Схема изменения микроструктуры металла с гексагональной плотноупакованной решеткой в ходе холодной деформации на станах холоднотрубной прокатки:

а – труба-заготовка; *б* – холодная прокатка на стане типа ХПТ; *в* – готовая труба (после термообработки) с радиальной ориентацией зерен металла; *г* – готовая труба (после термообработки) с тангенциальной ориентацией зерен металла;
 V_k – скорость возвратно-поступательного движения клетки; ω_b – угловая скорость вращения валков [1, 2]

Металл трубы-заготовки деформируется между валками, в которых нарезан ручей переменного радиуса, и конусной оправкой [2, 3]. Иногда оправку выполняют с уменьшающейся вдоль прямого хода клетки конусностью. Такие оправки называют «оправка с криволинейной образующей» формы рабочей поверхности. Вдоль конуса деформации организованы все необходимые для получения готовой трубы зоны: подачи; редуцирования; обжатия; калибровки стенки (предотделки); калибровки диаметра; обратного конуса; поворота. В каждой из этих зон совершается определенная для нее деформационная функция.

Поступающая для холодной деформации горячекатаная труба (из сплава типа Ti-3Al-2.5V) имеет хаотическую ориентацию базисных полюсов (рис. 1, *а*). В ходе деформации трубы обжатию подвергается как диаметр, так и толщина стенки. При этом следует различать деформацию трубы за проход, т. е. величину деформации, рассчитанную исходя из геометрических параметров трубы-заготовки и готовой трубы. Выделяют также величину деформации конкретного сечения за двойной ход клетки. Здесь рассматривают диаметр и толщину стенки после деформационного хода клетки и те же параметры этого сечения до деформационного хода. Из всех возможных показателей деформации следует выделить так называемый Q -фактор [1–3, 5]:

$$Q = \frac{\ln \frac{S_0}{S_1}}{\ln \frac{D_0 - S_0}{D_1 - S_1}}, \quad (1)$$

где S_0 – толщина стенки трубы-заготовки до деформации (либо толщина конкретного сечения конуса деформации перед деформационным ходом клетки); D_0 – диаметр трубы-заготовки до деформации (либо диаметр конкретного сечения конуса деформации перед деформационным ходом клетки); S_1 – толщина стенки готовой трубы (либо толщина конкретного сечения конуса деформации после деформационного хода клетки); D_1 – диаметр готовой трубы (либо диаметр конкретного сечения конуса деформации после деформационного хода клетки).

Как видно из формулы (1), Q -фактор рассчитывают как для прохода (общий), так и распределение этой величины вдоль конуса деформации каждого отдельного прохода. В последнем случае, как правило, ограничиваются анализом распределения Q -фактора вдоль зоны обжатия. Если Q -фактор больше единицы, то после правильной термообработки в трубе превалирует радиальная ориентация зерен, если меньше – тангенциальная. Из-за того, что при радиальной ориентации зерен сплава с ГПУ решеткой пластическая деформация происходит в основном скольжением, то для начала пластической деформации необходимо создать большие усилия, чем при тангенциальной. Необходимо лишь создать верные условия деформации как из прохода в проход, так и в каждом сечении зоны обжатия конуса деформации.

Если с расчетом значения Q -фактора за проход не возникает проблема, то при расчете распределения Q -фактора вдоль конуса деформации необходимо определить ряд вспомогательных величин. Расчет усложняется, если подача и поворот осуществляются как перед прямым, так и перед обратным ходами клетки. Здесь необходимо учитывать недеформированные участки поперечного сечения, остающиеся в каждом сечении конуса от предыдущего хода [1, 2, 4].

Выделение нерешенного. На распределение Q -фактора вдоль конуса деформации влияют множество факторов. Одним из недостаточно исследованных является величина подачи. При этом особое внимание следует обратить на процесс ХПТ с подачей и поворотом в обоих положениях клетки как наиболее производительный и перспективный.

Целью статьи является исследование влияния величины подачи на распределение Q -фактора вдоль зоны обжатия конуса деформации при прямом и обратном ходах клетки, при различных способах ведения процесса ХПТ.

Основной материал

Для анализа влияния величины подачи на распределение Q -фактора вдоль зоны обжатия выбран маршрут прокатки: $30 \times 3,6 \rightarrow 16 \times 1,11$ мм (вытяжка $\mu = 5,75$, обжатие: площади поперечного сечения $\varepsilon_F = 82,61\%$; толщины стенки $\varepsilon_S = 69,17\%$), стан – ХПТ-32, сплав – Ti-3Al-2.5V. Тип оправки: оправка с криволинейной образующей формы рабочей поверхности. Тип поперечного сечения ручья калибра: ручей с выпуском по радиусу, угол выпуска 35° . Режимы прокатки: подача перед прямым ходом, поворот перед обратным (случай 1, «классический случай»); подача и поворот в обоих положениях клетки (случай 2, «двойного поворота-подачи»). Расчетные величины подачи: 2, 4, 6, 8 мм. Расчет распределения Q -фактора будет проводиться для прямого и обратного ходов клетки в обоих случаях прокатки.

При классическом случае ведения процесса ХПТ обратный ход считается холостым. Однако результаты исследований показывают, что в ходе обратного «холостого» хода деформируется от 15 до 45% площади поперечного сечения трубы. Данный факт обусловливается наличием упругих деформаций клетки и выпусков в поперечном сечении ручья калибра. Как от одного, так и от другого полностью избавиться невозможно. Таким образом, в ходе расчета распределения Q -фактора вдоль зоны обжатия целесообразно учитывать ту часть металла поперечного сечения конуса деформации, которая остается недеформированной после прямого (рабочего) хода.

На рис. 2 показаны изменения функций Q -фактора вдоль конуса деформации в зависимости от величины подачи при ведении процесса ХПТ классическим способом. Из рисунка видно, что как при прямом ходе (рис. 2, а), так и при обратном (рис. 2, б) с увеличением подачи значения Q -фактора в конце конуса деформации возрастают. При этом в прямом ходе более значительный градиент изменений. Из-за этого в конце зоны обжатия возрастает разница в значениях Q -фактора прямого и обратного ходов.

Наименьшие значения Q -фактора – обратный ход $m=2$ мм ($Q=0,54$). При этой же величине подачи при прямом ходе Q -фактор в конце зоны обжатия падает до значения $Q=0,8$. При обратном ходе в конце зоны обжатия наблюдается падение Q -фактора до величин ниже $Q=1$. При прямом ходе Q -фактор падает ниже $Q=1$ при подачах $m=2$ мм и $m=4$ мм.

На рис. 3 показано влияние величины подачи на распределение Q -фактора между прямым и обратным ходами клетки в сечениях конуса деформации при ведении процесса ХПТ классическим способом.

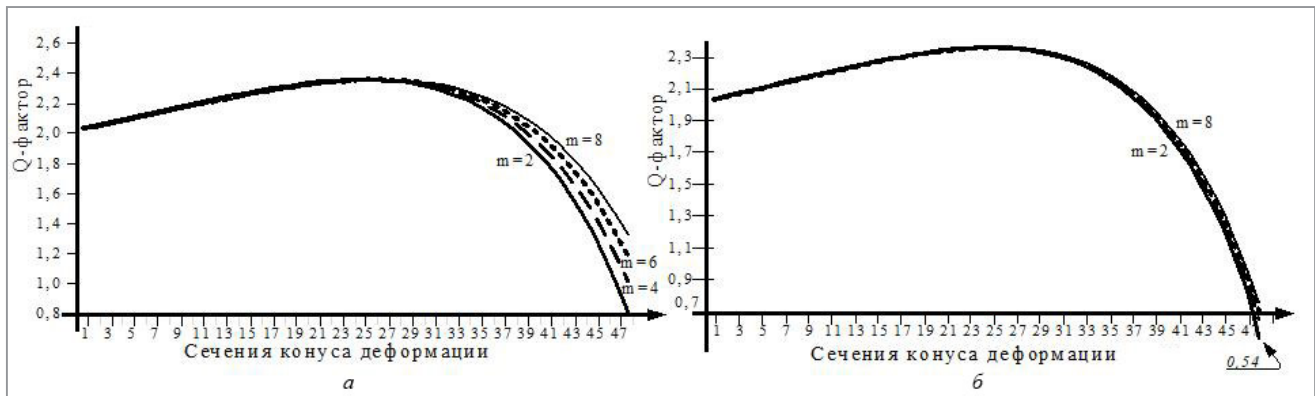


Рис. 2. Влияние величины подачи на распределение Q -фактора вдоль конуса деформации при ведении процесса ХПТ классическим способом (ХПТ-32, маршрут $30 \times 3,6 \rightarrow 16 \times 1,11$ мм): а – прямой ход; б – обратный ход

При подаче $t=2$ мм (рис. 3, а) нет большой разницы в функциях распределения Q -фактора прямого и обратного ходов. Большее падение значений Q -фактора обратного хода наблюдается только в самом конце зоны обжатия ($Q_{\text{пр.}}=0,8$, $Q_{\text{обр.}}=0,54$). Как видно из рис. 3, б, увеличение подачи ($t=8$ мм) приводит к образованию значительной разницы значений Q -фактора прямого и обратного ходов, но только во второй половине зоны обжатия. Сами же значения Q -фактора при $t=8$ мм принимают большие значения, чем при $t=2$ мм. При $t=8$ мм падение Q -фактора ниже единицы наблюдаются при обратном ходе, в самых последних сечениях зоны обжатия ($Q_{\text{обр.}}=0,78$). В этих сечениях разница в значениях Q -фактора прямого и обратного ходов достигает наибольшего значения.

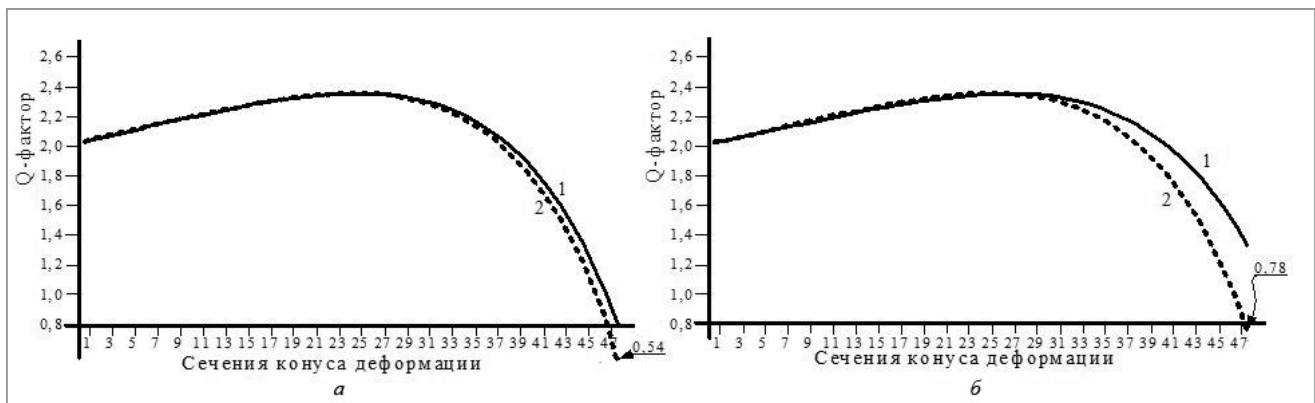


Рис. 3. Влияние величины подачи на распределение Q -фактора между прямым и обратным ходами клетки в сечении конуса деформации при ведении процесса ХПТ классическим способом (ХПТ-32, маршрут $30 \times 3,6 \rightarrow 16 \times 1,11$ мм): а – величина подачи $t=2$ мм; б – величина подачи $t=8$ мм; 1 – прямой ход; 2 – обратный ход

Далее рассматривается случай прокатки с подачей и поворотом в обоих положениях клетки. Как и в рассмотренном выше случае, с увеличением величины подачи значения Q -фактора во второй половине конуса деформации принимают все большие значения (рис. 4, а, б). Причем градиент роста Q -фактора при прямом ходе больше (рис. 4, а), чем при обратном (рис. 4, б). При прямом ходе наименьшие значения Q -фактора наблюдаются при подаче $t=2$ мм ($Q_{\text{пр.}}=1,01$). При обратном ходе при той же подаче Q -фактор принимает значение $Q_{\text{обр.}}=0,8$. При подаче $t=6$ мм все полученные значения Q -фактора (и прямого, и обратного ходов) лежат выше $Q=1$.

В случае совершения подачи и поворота в обоих положениях клетки применение большей подачи также приводит к увеличению разницы в значениях Q -фактора прямого и обратного ходов (во второй половине зоны обжатия). Градиент роста значений Q -фактора прямого хода больше, чем обратного. Картина такая же, как и в случае классического способа ведения процесса ХПТ (рис. 5).

Если в стане ХПТ при ведении процесса с подачей и поворотом в обоих положениях клетки возможно рассогласование величины подачи, например, $m_{\text{пр.}}=4$ мм, а $m_{\text{обр.}}=6$ мм, то наблюдается картина практически полного слияния функций распределения Q -фактора вдоль всей зоны обжатия (рис. 6). В этом случае Q -фактор принимает значения больше $Q=1$ на всем протяжении зоны обжатия. Данный прием

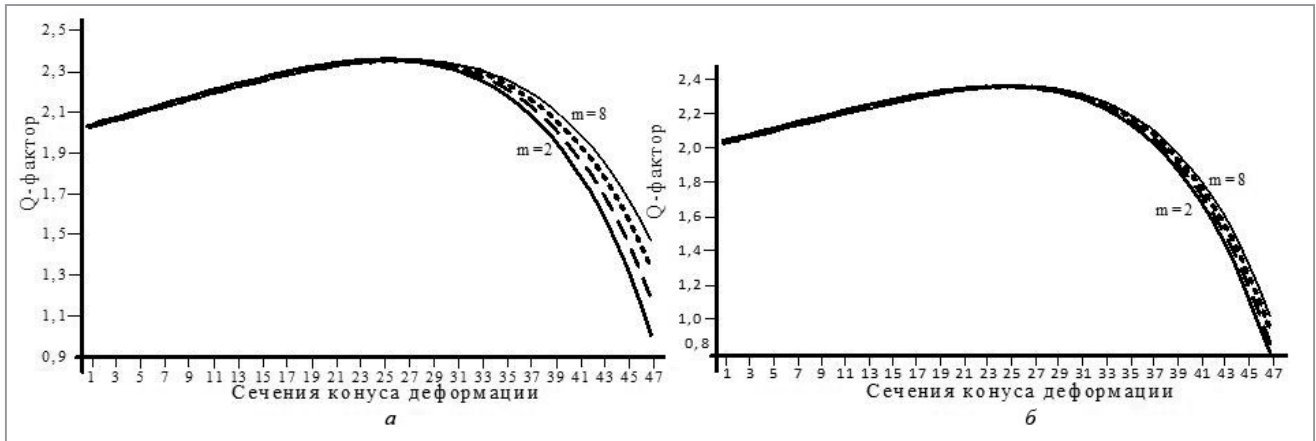


Рис. 4. Влияние величины подачи на распределение Q -фактора вдоль конуса деформации при ведении процесса ХПТ с подачей и поворотом в обоих положениях клетки (ХПТ-32, маршрут $30 \times 3,6 \rightarrow 16 \times 1,11$ мм): а – прямой ход; б – обратный ход

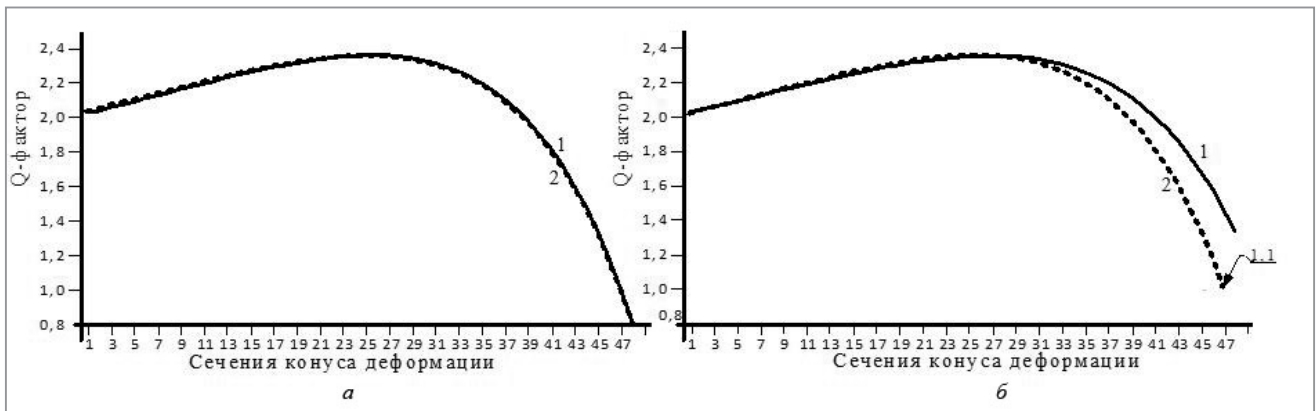


Рис. 5. Влияние величины подачи на распределение Q -фактора между прямым и обратным ходами клетки в сечениях конуса деформации при ведении процесса ХПТ с подачей и поворотом в обоих положениях клетки (ХПТ- 32, маршрут $30 \times 3,6 \rightarrow 16 \times 1,11$ мм): а – величина подачи $m=2$ мм; б – величина подачи $m=8$ мм; 1 – прямой ход; 2 – обратный ход

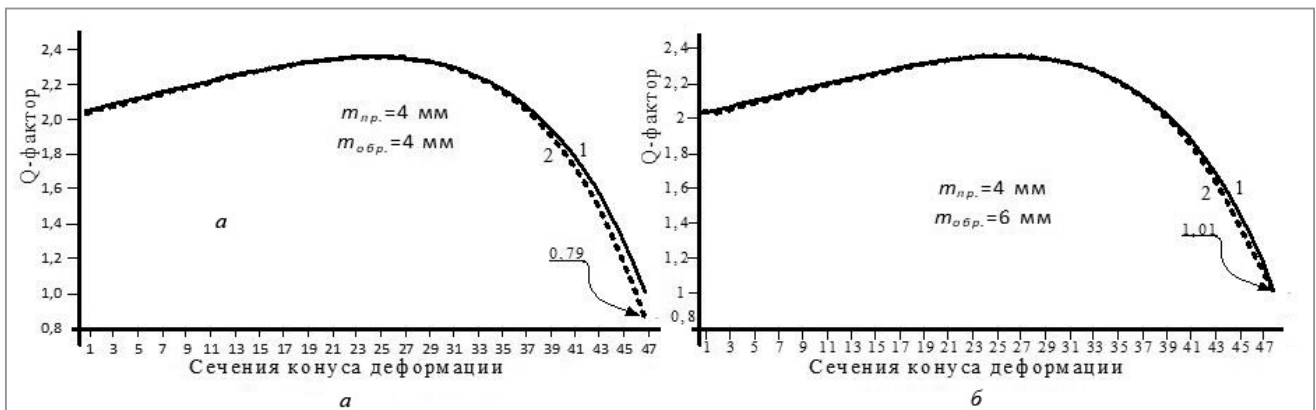


Рис. 6. Влияние рассогласования величины подачи на распределение Q -фактора между прямым и обратным ходами клетки в сечениях конуса деформации при ведении процесса ХПТ с подачей и поворотом в обоих положениях клетки (ХПТ-32, маршрут $30 \times 3,6 \rightarrow 16 \times 1,11$ мм): а – величина подачи $m_{пр.} = m_{обр.} = 4$ мм; б – величина подачи $m_{пр.} = 4$ мм, $m_{обр.} = 6$ мм; 1 – прямой ход; 2 – обратный ход; $m_{пр.}$ – подача при прямом ходе; $m_{обр.}$ – подача при обратном ходе

можно использовать в случае, когда есть ограничения по максимальной величине Q -фактора или когда увеличение подачи выводит усилие на валок за его допустимое значение.

В конусе деформации после зоны обжатия находится зона предотделки. Вдоль этой зоны калибруется толщина стенки, но обжатие по диаметру все же присутствует. Здесь Q -фактор явно меньше $Q=1$. Отсутствие зоны предотделки в калибровке рабочего инструмента приводит к возникновению волнистости

толщины стенки готовой трубы. Трубе наводится определенная степень продольной разностенности периодического характера. Увеличивается и поперечная разностенность. Для предотвращения этих явлений длина зоны предотделки должна быть длиной около $1,35-1,5m_{\Sigma}$, где m_{Σ} – общая величина вытяжки за проход.

Предлагается вести прокатку на оправке с криволинейной образующей при малой ее начальной конусности, т.е. конусность возле пережима должна быть $2tg\alpha=0,05$. Таким образом, в этой части конуса деформации величина редуцирования будет минимальной. При этом не усложнится процесс настройки стана. Продольным перемещением оправки еще возможно изменять толщину стенки в достаточных пределах. Вдоль зоны предотделки (на стадии расчета калибровки инструмента) необходимо организовывать определенную величину обжатия по толщине стенки. Обжатие должно быть гораздо меньше, чем допуск по толщине стенки готовой трубы. Как показывает личная практика расчета калибровок инструмента станов ХПТ, таким образом возможно добиться того, чтобы в этой части конуса деформации величина Q -фактора не падала ниже $Q=1$.

Выводы

1. Теоретические исследования влияния величины подачи на распределение Q -фактора вдоль конуса деформации стана ХПТ показывают, что при увеличении подачи наблюдается рост значений Q -фактора во второй половине зоны обжатия. При этом градиент роста значений Q -фактора прямого хода больше, чем обратного. Из-за этого в конечных сечениях зоны обжатия возрастает разница между значениями Q -фактора прямого и обратного ходов.

2. В случае прокатки с подачей и поворотом в обоих положениях клетки отмечаются более благоприятные функции распределения Q -фактора вдоль зоны обжатия ($Q_i > 1$), чем при ведении процесса ХПТ классическим способом (с подачей перед рабочим ходом, а поворотом перед холостым).

3. При ведении процесса ХПТ классическим способом наименьшие значения Q -фактора наблюдаются в конце зоны обжатия при подаче $m=2$ мм ($Q=0,54$). В этом же случае и в том же сечении прямого хода Q -фактор принимает значение $Q=0,8$. При классическом способе ведения процесса ХПТ все значения Q -фактора обратного хода клетки в конце зоны обжатия падают ниже $Q=1$. При прямом ходе $Q < 1$ наблюдаются при подачах $m=2$ мм и $m=4$ мм.

4. При ведении процесса ХПТ с подачей и поворотом в обоих положениях клетки при подаче $m=4$ мм и выше все значения Q -фактора прямого хода лежат в пределах $Q > 1$. При обратном ходе условие $Q_i > 1$ наблюдается при $m=6$ мм и выше.

5. Рассогласование величины подачи между прямым и обратным ходами ($m_{пр.}=4$ мм, $m_{обр.}=6$ мм) приводит к образованию минимальной разницы в величинах Q -фактора ходов во всех сечениях зоны обжатия.

6. Для нивелировки влияния особенностей деформации сечений трубы в зоне предотделки на образование необходимой микроструктуры сплавов типа Ti-3Al-2.5V предлагается использовать оправки с криволинейной образующей. Начальная конусность оправки (конусностью возле пережима) должна быть около $2tg\alpha=0,05$. При расчете калибровки инструмента вдоль этой зоны предлагается организовывать обжатие по толщине стенки. Однако величина его должна быть гораздо меньше необходимого значения абсолютной разностенности готовой трубы.

ЛИТЕРАТУРА

1. A deformation mode in a cold rolling condition to provide the necessary texture of the Ti-3Al-2.5V alloy / S. V. Pilipenko [et al.] // *Naukovyi visnyk natsionalnoho hirnychoho universytetu*. – 2021. – № 1. – P. 78–83.
2. Томило, В. А. Обеспечение необходимого типа микроструктуры металла титановых и циркониевых труб / В. А. Томило, С. В. Пилипенко // *Литье и металлургия*. – 2022. – № 1. – С. 106–112.
3. Шевакин, Ю. Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб / Ю. Ф. Шевакин. – М: Металлургиздат, 1963. – 269 с.
4. Пилипенко, С. В. Анализ влияния технологических факторов процесса холодной прокатки труб на изменение распределения Q -фактора вдоль конуса деформации / С. В. Пилипенко // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. – 2019. – № 3. – С. 30–35.
5. Forney C. E. Ti-3Al-2,5V Seamless tubing engineering guide / C. E. Forney, S. E. Meredith. – Washington: Sandvik Special Metals Corp, 1990. – 144 p.

REFERENCES

1. Pilipenko S. V., Grigorenko V. U., Kozzechko V. A., Bohdanov O. O. A deformation mode in a cold rolling condition to provide the necessary texture of the Ti-3Al-2.5V alloy. *Naukovyi visnyk natsionalnoho hirnychoho universytetu*, 2021, no. 1, pp. 78–83.

2. **Tomilo V.A., Pilipenko S.V.** Obespechenie neobhodimogo tipa mikrostruktury metalla titanovyh i cirkonievyyh trub [Providing the necessary type of metal microstructure of titanium and zirconium pipes]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 106–112.
3. **Shevakin Ju. F.** *Kalibrovka i usilija pri holodnoj prokatke trub* [Calibration and forces during cold rolling of pipes]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1963, 269 p.
4. **Pilipenko S.V.** Analiz vlijanija tehnologicheskikh faktorov processa holodnoj prokatki trub na izmenenie raspredelenija Q-faktora vdol' konusa deformacii [Analysis of the influence of technological factors of the process of cold rolling of pipes on the change in the distribution of the Q-factor along the deformation cone]. *Izvestija vuzov. Cvetnaja metallurgija = Proceedings of universities. Non-ferrous metallurgy*, 2019, no. 3, pp. 30–35.
5. **Forney C.E., Meredith S.E.** *Ti-3Al-2,5V Seamless tubing engineering guide*. Washington: Sandvik Special Metals Corp, 1990. 144 p.