

УДК621.774: 621.78

Бобух А. С.  
Терешенко А. А.  
Фролов Я. В.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПИЛЬГЕРНОЙ ПРОКАТКЕ НА ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ТРУБ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

К трубам из стали типа 08X18H10T (304) или других аналогичных марок сталей, которые используются в энергетическом машиностроении, предъявляются высокие требования с точки зрения получения определенной структуры металла. К таким требованиям, в первую очередь, относится ограничение по величине зерна после термообработки.

В связи с этим была проведена оценка влияния режима деформации на способность металла к разупрочнению при термической обработке. Проверка была выполнена для труб из стали 08X18H10T, прокатанных на стане ХПТ 90 по маршруту  $88 \times 7,3-48 \times 3,9$  мм. Прокатка проводилась двумя режимами.

Режим 1 – по методу пропорциональных обжатий. Основным фактором, который определяет соответствие калибровки методу пропорциональности обжатий является пропорциональное уменьшение наружного диаметра и толщины стенки по длине рабочего конуса, что заложено в калибровки типа КПО [1]:

– для диаметра оправки:

$$d_x = d_t + (d_u - d_t - \alpha_{\min} l)(x/l)^n + \alpha_{\min} l(x/l); \quad (1)$$

– для диаметра ручья:

$$D_x = D_t + (D_3 - D_t - \gamma_{\min} l)(x/l)^n + \gamma_{\min} l(x/l), \quad (2)$$

где  $D_3$ ,  $D_t$  и  $d_t$  – соответственно, наружные диаметры заготовки, трубы и внутренний диаметр трубы;  $\gamma_{\min}$  и  $\alpha_{\min}$  – минимальные конусности ручья и оправки;  $l$  – длина обжимной зоны;  $x$  – текущая координата длины обжимной зоны (от пережима);  $n$  – показатель степени, определяющий крутизну профиля гребня ручья и образующей оправки;  $d_u$  – диаметр цилиндрической части оправки.

Показатель степени  $n$ , имеющий равные значения для ручья калибров и оправки, обеспечивает пропорциональность обжатий по диаметру и толщине стенки, а также определяет крутизну профиля гребня ручья, образующей оправки и, соответственно, характер распределения обжатий по длине рабочего конуса находится, в соответствии с, по зависимости:

$$n = \frac{\ln \mu_{xD}}{\ln \mu_{xt}} = \frac{\varepsilon_D}{\varepsilon_t} = const. \quad (3)$$

В литературе описано несколько подходов к определению величины показателя  $n$  или его заменителей в формулах для описания профиля ручья и оправки [2].

Режим 2 – предлагаемый способ в котором распределение доли деформации по диаметру изменяется в соответствии с уравнениями (4), (5), (6) и (7) [1], а показатель изменения формы поперечного сечения определялся по зависимости (8) [3].

Целью данной работы является определение степени влияния режима деформации при холодной пильгерной прокатке на структуру металла после термической обработки.

Исходя из того, что задачей расчета режима деформации является определение параметров деформации, уравнение связи между параметрами деформации и изменением механических свойств металла может быть записано в виде:

$$\frac{\varepsilon_{xD}}{\varepsilon_x} = \frac{\ln(S_{\sigma_x})}{b_d}, \quad (4)$$

где  $S_{\sigma}$  – показатель использования ресурса механических свойств;  $b_D$  – коэффициент интенсивности использования ресурса механических свойств металла;  $\varepsilon_D/\varepsilon_{\Sigma}$  – доля обжатий по диаметру в суммарной деформации площади поперечного сечения рабочего конуса.

Исходя из этого, для данной группы сталей и маршрутов прокатки были определены закономерности, которые обеспечивают снижение распределения доли деформации по диаметру в суммарной деформации по площади поперечного сечения вдоль рабочего конуса в соответствии с изменением механических свойств металла:

– для диапазона  $(\varepsilon_D/\varepsilon_{\Sigma}) = 0,25 \dots 0,6$ :

$$\varepsilon_{Dx} = \left[ \frac{\sigma_{T3}}{\sigma_{B3}} \varepsilon_x \left(1 - \frac{b}{a}\right) \right]^{\left(\frac{q-1}{m}\right) \frac{1}{k_{bx}}}; \quad (5)$$

– для диапазона  $(\varepsilon_D/\varepsilon_{\Sigma}) = 0,6 \dots 0,75$ :

$$\varepsilon_{Dx} = \left[ \frac{\sigma_{T3}}{\sigma_{B3}} \varepsilon_x \left(\frac{b}{a}\right) \right]^{\left(\frac{q-1}{m}\right) \frac{1}{k_{bx}}}, \quad (6)$$

где  $k_b$  – коэффициент, учитывающий форму поперечного сечения рабочего конуса.

Таким образом, впервые определены зависимости (5) и (6) доли деформации по диаметру от деформации по площади поперечного сечения в условиях непрерывного нарастания деформации по длине рабочего конуса и соответствующего изменения свойств металла при холодной пильгерной прокатке труб. Зависимости (5) и (6) учитывают текущие параметры очага деформации и в определенных граничных условиях обеспечивают варьирование по длине рабочего конуса доли деформации по диаметру для удержания свойств металла в заданном диапазоне. Это позволяет распределить деформацию по диаметру по длине рабочего конуса, не ограничиваясь параметрами маршрута прокатки, что в свою очередь, обеспечивает большую гибкость при проектировании технологии холодной пильгерной прокатки.

Кроме того, зависимости (5) и (6) позволяют в рамках заданного показателем  $n$  закона изменения площади поперечного сечения рабочего конуса обеспечить переменное соотношение обжатий по диаметру и толщине стенки в соответствии с изменением механических свойств металла в очаге деформации при холодной пильгерной прокатке.

Распределение частных суммарных деформаций по длине рабочего конуса  $\varepsilon_x$  рассчитываем по зависимости:

$$\varepsilon_x = 1 - \frac{1}{\mu_{\Sigma} \left(1 - \left(\frac{x}{l}\right)^n\right)}. \quad (7)$$

Такое распределение частных суммарных деформаций, которое соответствует методу пропорциональности обжатий, является одним из основных параметров деформации при холодной пильгерной прокатке и основой для расчета формы деформирующего инструмента. Для этого, используя зависимость (7) и зависимости (5) и (6), которые обеспечивают снижение доли деформации по диаметру в суммарной частной деформации  $\varepsilon_{xD}/\varepsilon_x$  по длине рабочего конуса в соответствии с изменением механических свойств металла.

В усовершенствованном методе пропорциональности обжатий площадь поперечного сечения изменяется по зависимости (4). Таким образом, уменьшение разницы между эквивалентными и фактическими размерами поперечного сечения рабочего конуса должно также проходить в соответствии с методом пропорциональности обжатий и определяться величиной показателя степени  $n$ :

$$k_{bx} = k_{b\max} \left(1 - \left(\frac{x}{l}\right)^n\right). \quad (8)$$

После прокатки патрубки, вырезанные из рабочих конусов в контрольных сечениях с фиксированной накопленной деформацией, подвергались термической обработке. Термообработка проводилась в лабораторной электрической печи в диапазоне температур 600...1200 °С, с выдержкой 5 мин и охлаждением на воздухе.

После термообработки из патрубков были вырезаны и приготовлены образцы для металлографического исследования, результаты которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Температурный интервал рекристаллизации металла труб, прокатанных по базовому (режим 1) и предложенному (режим 2) режимам деформации на участках рабочего конуса, соответствующих фиксированным степеням деформации

| Режим деформации | Накопленная к исследуемому сечению степень деформации $e_x$ , % | Температурный интервал рекристаллизации, °С | Снижение температуры начала/конца рекристаллизации для режима 2, °С |
|------------------|---|---|---|
| 1                | 20  | 950...1150                                  | 25/50   |
| 2                |   | 925...1100                                  |   |
| 1                | 30  | 900...1150                                  | 50/50   |
| 2                |   | 850...1100                                  |   |
| 1                | 50  | 850...1100                                  | 50/50   |
| 2                |   | 800...1050                                  |   |
| 1                | 70  | 775...1050                                  | 25/50   |
| 2                |   | 750...1000                                  |   |

Таким образом, можно сделать вывод о том, что температуры начала и конца рекристаллизации стали 08X18H10T при прокатке по предложенному в работе режиму деформации имеют меньшие значения.

На рис. 1 показаны фотографии микрошлифов из патрубков, соответствующих 30 % (рис. 1, а) и 70 % (рис. 1, б) накопленной к исследуемому сечению суммарной деформации (табл. 1).

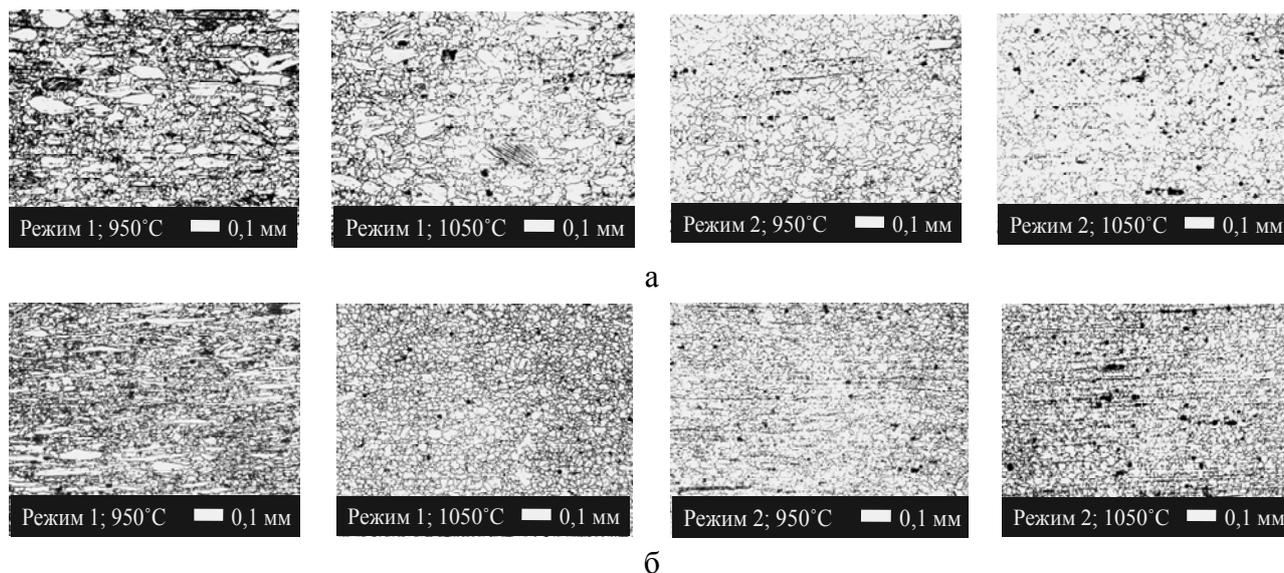


Рис. 1. Микроструктура металла образцов из рабочих конусов в сечениях, соответствующих фиксированной степени деформации после термообработки при температурах 950 и 1050 °С при прокатке по базовому (режим 1) и предложенному (режим 2) режимам деформации; (а) – 30, (б) – 70 % накопленной деформации

Как видно из рис. 1, при одинаковых степенях деформации и температурных условиях термической обработки в металле образцов, прокатанных по предложенному в работе режиму деформации, объем рекристаллизованных зерен больше, чем в металле образцов, прокатанных по базовому режиму деформации. Это связано с увеличением степени локализации пластической деформации при прокатке с увеличенной долей деформации по диаметру в начале рабочего конуса за счет предпочтительного развития процессов поперечного скольжения и упорядочивания дислокаций, что приводит к созданию условий для образования больше угловых границ. Таким образом, холодная пильгерная прокатка труб из стали 08X18H10T по предложенному в работе режиму деформации приводит к формированию такого структурного состояния деформированного металла, которое обеспечивает получение при последующей термической обработке более однородной и мелкозернистой структуры, чем при прокатке по базовому режиму деформации. При опытной прокатке труб размерами  $18 \times 2,5$  мм,  $22 \times 2$  мм, а также  $32 \times 1,3$  мм в промышленных условиях по предложенному в работе режиму деформации установлено, что величина зерна во всех случаях соответствовала 9...11 баллу по ASTM E 112, что удовлетворяет техническим требованиям к этим трубам. Термообработка при промышленных испытаниях проводилась по режиму: температура по зонам: I – 1020 °С, II – 1050 °С, III – 1060 °С; скорость перемещения  $U = 2,3$  м/мин; охлаждение воздушными спреями.

Для маршрута  $38 \times 3,6$ – $18 \times 1,5$  после прокатки и рекристаллизационного отжига по ASTM A312 в печи с защитной атмосферой водорода производства фирмы «LOI», на лабораторном микроскопе Axiovert 40 MAT по методике ASTM E112 проведено исследование структуры металла труб, прокатанных по режимам деформации, рассчитанных с использованием следующих методов: метод распределения частных обжатий в соответствии с постоянством приращения частных вытяжек (Метод 1); метод пропорциональности обжатий по диаметру и толщине стенки (Метод 2); предложенный в данной работе метод распределения частных деформаций, основанный на зависимости параметров деформации от изменения механических свойств (4) (Метод 3), который обеспечивает уменьшение части деформации по диаметру по длине рабочего конуса в соответствии с изменением механических свойств металла.

На рис. 2 приведена диаграмма распределения величины зерна по площади поперечного сечения шлифа.

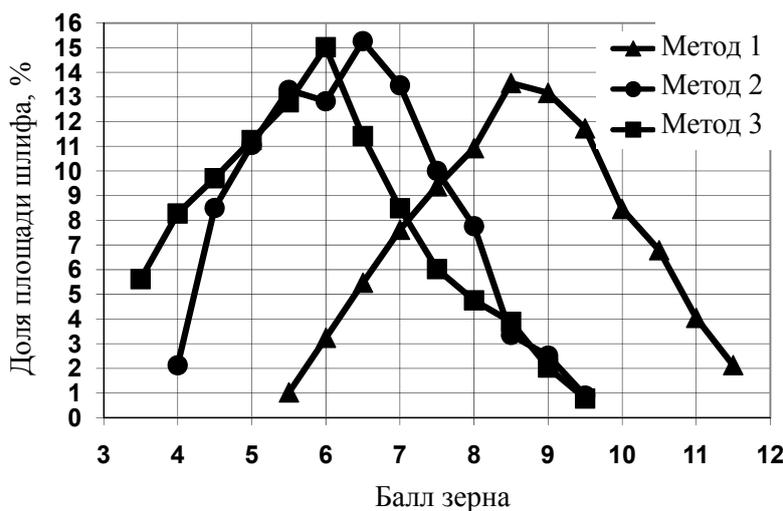


Рис. 2. Диаграмма распределения величины зерна по площади поперечного сечения шлифа (прокатка по маршруту  $38 \times 3,6$ – $18 \times 1,5$  мм, после термообработки)

Трубы, которые были прокатаны по режимам деформации, основанных на методах 1 и 2 не удовлетворяли требований заказчика (размер зерна не более 7 балла). Структура металла труб, которые были прокатаны с использованием предложенного в работе метода расчета

режима деформации, в отличие от методов 1 и 2 имеет зерна 10...11,5 баллов и не имеет зерен 3,5...4 баллов. Это свидетельствует о том, что распределение доли деформации по диаметру в суммарной деформации по площади поперечного сечения позволяет получать трубы с мелкозернистой структурой, которая, собственно и обеспечивает повышенный ресурс свойств металла в условиях последующей эксплуатации. На рис. 3 представлены фотографии микрошлифов металла труб после термообработки.

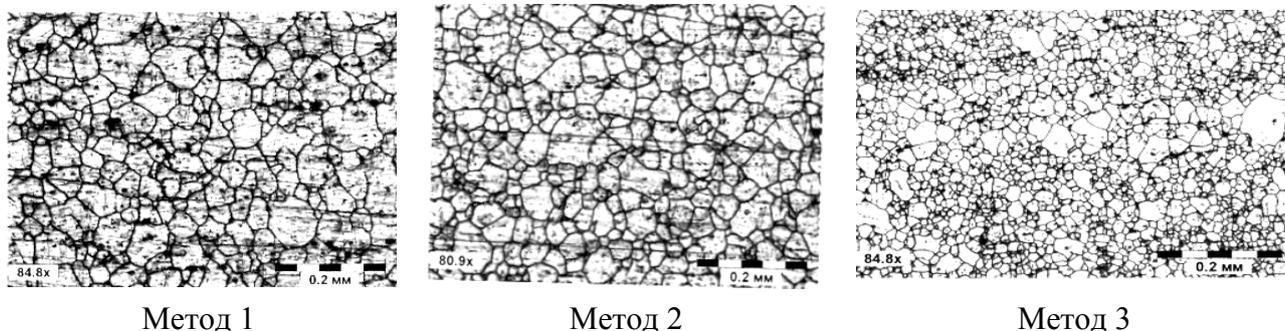


Рис. 3. Фотографии микрошлифов металла труб  $18 \times 1,5$  мм из стали 304 после прокатки и термообработки

### ВЫВОДЫ

Представлен режим деформации, который позволяет прогнозировать изменение структуры металла труб после термической обработки. Установлено, что температуры начала и конца рекристаллизации стали 08X18N10T при прокатке по предложенному в работе режиму деформации имеют меньшие значения. При одинаковых степенях деформации и температурных условиях термической обработки в металле образцов режим обеспечивает получение при последующей термической обработке более однородной и мелкозернистой структуры, чем в металле образцов, прокатанных по базовому режиму деформации.

Сравнение расчетных и фактических значений показателя использования ресурса свойств металла показало, что использование предложенной зависимости, которая связывает изменение механических свойств металла и параметров режима деформации, позволяет с достаточной точностью прогнозировать влияние режима деформации на использование ресурса свойств металла.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов В. Ф. *Холодная пильгерная прокатка труб : монография* / В. Ф. Фролов, В. Н. Данченко, Я. В. Фролов. – Дніпропетровськ : Пороги, 2005. – 255 с.
2. Фролов Я. В. Учет упрочнения металла при проектировании режима деформации на стане ХПТ / Я. В. Фролов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 8–9. – С. 423–426.
3. Фролов Я. В. Розвиток методу розрахунку параметрів інструменту для холодної пильгерної прокатки труб / Я. В. Фролов // *Теорія і практика металургії*. – 2009. – № 5–6. – С. 67–70.

Бобух А. С. – аспирант НМетАУ;

Терещенко А. А. – нач. отдела ЧАО «Сентравис Продакшн Юкрейн»;

Фролов Я. В. – д-р техн. наук, доц. НМетАУ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

ЧАО «Сентравис Продакшн Юкрейн» – частное акционерное общество «Сентравис Продакшн Юкрейн», г. Никополь.

E-mail: 1806@warehouse.mail.ua