

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСА ПОВЫШЕННЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ СТАЛИ 20 МЕТОДОМ МЕХАНОТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ*

А.С. ПЕРЦЕВ, аспирант

Д.О. ПАНОВ, ст. преподаватель

А.П. НИШТА, канд. техн. наук

*Ю.Н. СИМОНОВ д-р. техн. наук, профессор
(ПНИПУ, г. Пермь)*

П.А. ПОПЕЛЮХ, аспирант

*Н.В. ПЛОТНИКОВА, канд. техн. наук
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Статья поступила 20 декабря 2012 года

Перцев А.С. – 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: mto@pstu.ru

Исследованы процессы формирования комплекса повышенных механических характеристик трубных заготовок из стали 20 при комплексной механотермической обработке, включающей исходное термоулучшение, холодную радиальную ковку и последеформационный отжиг в широком интервале температур.

Ключевые слова: конструкционная сталь 20, механотермическая обработка, радиальная ковка, последеформационный отжиг, повышенный комплекс механических характеристик.

Введение

Метод упрочнения стали термомеханической обработкой был открыт и получил широкое применение в промышленности в середине XX века [1].

В настоящее время перспективным вариантом механотермической обработки является последовательное применение операций пластической деформации различными методами и термической обработки с целью получения ультрамелкозернистой (УМЗ) и наноструктур.

Наиболее эффективными способами пластической деформации являются равноканальное угловое прессование (РКУП) и кручение под высоким давлением. РКУП как способ упрочнения конструкционных сталей, в том числе и стали 20, изучен достаточно подробно [2]. Однако данный метод является лабораторным и имеет ряд существенных требований к размерам исходных заготовок под деформацию и получаемых изделий.

Существуют также и другие методы деформации, позволяющие получать УЗМ и наноструктуры в объемных (массивных) образцах – это деформация всесторонней ковкой [3], радиальной ковкой и штамповкой обкатыванием [4].

Целью данной работы является исследование закономерностей изменения механических характеристик промышленных заготовок из стали 20, подвергнутых в исходно-термоулучшенном состоянии холодной радиальной ковке и последеформационному отжигу в широком интервале температур.

Материалы и методики проведения исследований

В качестве материала исследования выбрана углеродистая конструкционная сталь 20, имеющая следующий химический состав, % (масс.): 0,24 С; 0,39 Мн; 0,22 Сг; 0,14 Мо; 0,25 Si; 0,18 Ni; 0,15 Cu; 0,022 S; 0,012 P.

* Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, соглашение № 14.В37.21.2065.

Трубные заготовки из стали 20 подвергали термическому улучшению по режиму: закалка от 860 °С (40 мин) в воде и последующий отпуск при 570 °С, 1 ч охлаждение в воде. Данное состояние принимается в работе в качестве исходного и далее по тексту обозначается как “исходно-термоулучшенное”.

Затем заготовки из стали 20 деформировали радиальной ковкой: исходная заготовка – труба Ø70×15 мм, поковка – труба Ø54×8 мм, что соответствует степени деформации, примерно равной 55 %. Радиальную ковку осуществляли за три последовательных прохода.

Исследования микроструктуры проводили на микрошлифах с использованием светового микроскопа Carl Zeiss AxioObserver A1m при увеличениях до 1000 крат. Выявление микроструктуры проводили путем травления микрошлифов 3 %-м раствором азотной кислоты в этиловом спирте.

Испытания на одноосное растяжение проводили с помощью системы универсальной серво-

гидравлической типа Instron 300DX. Расчет характеристик прочности (σ_b , $\sigma_{0,2}$) и пластичности (δ , ψ) проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84 на пятикратных цилиндрических образцах, тип III № 7.

Испытания на ударный изгиб проводили на маятниковом копре типа Metro Com в соответствии с ГОСТ 9454–78 на образцах с концентратором U (типоразмер 3 по ГОСТ 9454), а также на образцах с предварительно наведенной усталостной трещиной (тип 17 по ГОСТ 9454).

Результаты исследований и их обсуждение

Микроструктуры образцов стали 20 в исходном термоулучшенном состоянии и после радиальнойковки с суммарной степенью деформации 55 % представлены на рис. 1. Съемки микроструктуры на трубных заготовках производили в двух местах – вблизи наружной и вблизи внутренней поверхностей.

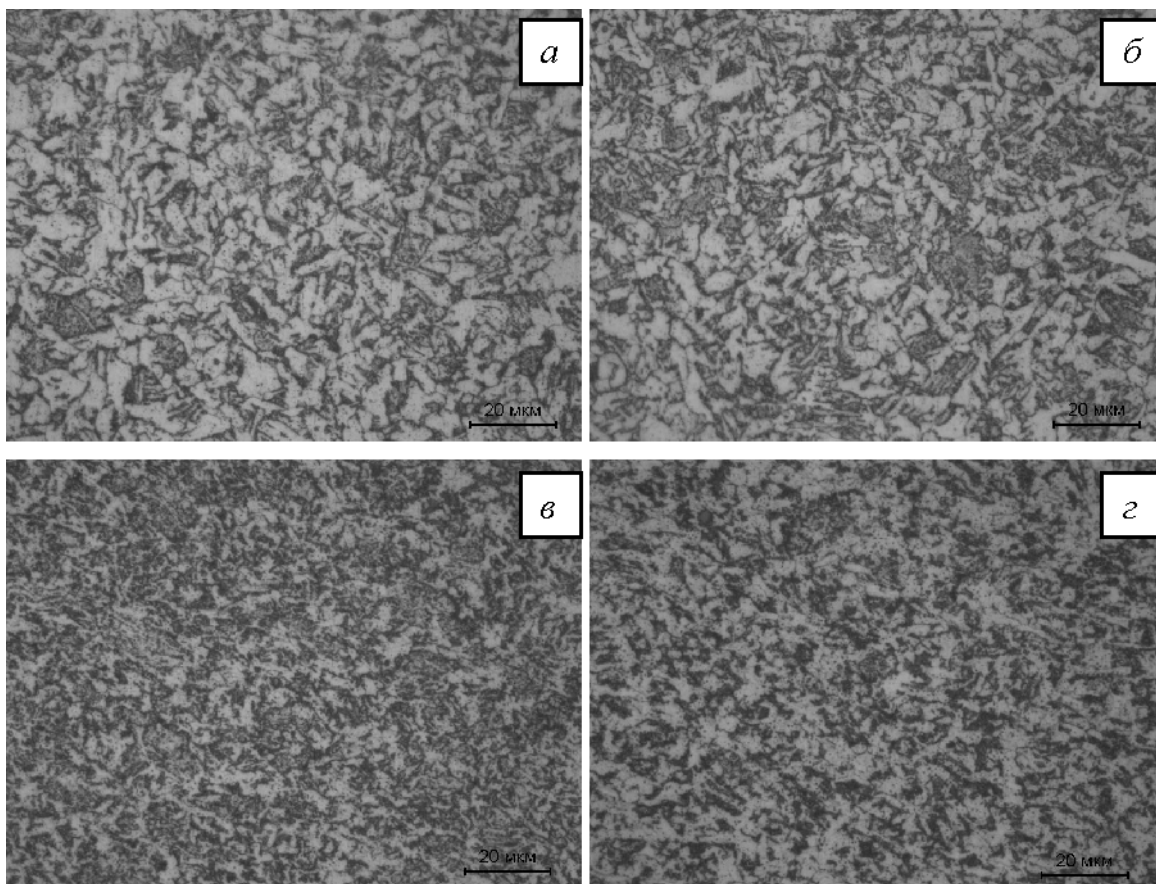


Рис. 1. Микроструктура стали 20 при увеличении $\times 1000$ в исходном термоулучшенном состоянии (а, б) и после трех проходов РК (в, г): а, в – вблизи наружной поверхности; б, г – вблизи внутренней поверхности

**Характеристики механических свойств трубных заготовок из стали 20
после различных видов обработки**

Номер и режим обработки	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	ψ	KCU	KCT
	МПа		%		МДж/м ²	
Улучшение	400	570	31,2	76,5	2,20	1,75
Улучшение + $\epsilon=22\%$	600	655	21,5	71,0	1,85	1,40
Улучшение + $\epsilon=40\%$	675	730	18,2	70,5	1,90	1,40
Улучшение + $\epsilon=55\%$	765	825	13,5	65,5	1,60	1,15
$\epsilon=53\%$ + отжиг при 300 °С	815	820	9,8	66,0	1,60	1,55
$\epsilon=53\%$ + отжиг при 500 °С	770/735	770	8,8	66,5	1,70	1,55
$\epsilon=53\%$ + отжиг при 600 °С	640	645	20,8	73,5	2,15	1,70

Структуру стали 20, полученную в трубных заготовках после термического улучшения, можно классифицировать как высокоотпущенный мартенсит и некоторое количество избыточной ферритной фазы. Присутствие ферритной фазы, выделившейся отдельными участками, можно объяснить низкой прокаливаемостью данной стали. После проведения радиальнойковки за три прохода с суммарной степенью деформации 55 % структура становится более дисперсной, участки ферритной фазы сохраняются, однако их размер уменьшается.

Результаты испытания механических характеристик стали 20 после различных видов обработки представлены в таблице.

Сравнительный анализ характеристик механических свойств стали 20 показывает, что проведение РК со степенью деформации 40 % приводит к повышению предела текучести на 69 %, предела прочности на 28 %, при этом характеристики пластичности и ударной вязкости остаются на достаточно высоком уровне: $\delta = 18,2\%$, $\psi = 70,5\%$, $KCU = 1,9$ МДж/м² и $KCT = 1,4$ МДж/м² (см. таблицу).

Увеличение степени деформации до 55 % приводит к повышению $\sigma_{0,2}$ на 90 %, σ_B на 45 % и снижению δ на 56 %, ψ на 15 %, KCU на 27 % и KCT на 17 % по сравнению с исходным высокоотпущенным состоянием. Следует отметить, что механические характеристики после проведения радиальнойковки со степенью деформации 55 % на трубных заготовках из стали 20 находятся на достаточно высоком уровне и составляют: $\delta = 13,5\%$, $\psi = 65,5\%$, $KCU = 1,6$ МДж/м² и $CT = 1,15$ МДж/м² (см. таблицу).

Анализ вида диаграмм растяжения образцов из стали 20 (рис. 2) показывает, что после РК с различными степенями деформации характер диаграмм изменяется по сравнению с исходной. На диаграмме растяжения образцов в исходном состоянии наблюдается площадка текучести, которая отсутствует после проведения РК с различными степенями деформации. Вследствие этого для образцов в деформированном состоянии реализуется только условный предел текучести, за которым следует участок деформационного упрочнения. Длина участка деформационного упрочнения после одного и двух проходов радиальнойковки остается на достаточно высоком уровне. После трех проходов РК с суммарной степенью деформации 55 % горизонтальный участок после достижения максимального напряжения практически отсутствует, и дальнейшее удлинение образца идет с плавным уменьшением напряжения. Это говорит о том, что после такой степени деформации методом радиальнойковки данный материал исчерпал возможность к равномерному пластическому течению. Однако относительное удлинение образца после данного вида обработки составляет более 13 %, и высокая ударная вязкость позволяет говорить о высокой надежности такого материала и его практическом применении.

Проведение последеформационного отжига при 300 °С на стали 20 приводит к достижению максимальных характеристик прочности (см. таблицу), при этом снижается относительное удлинение образца, а относительное сужение и ударная вязкость остаются на уровне деформированного состояния. На диаграмме растяжения после такого отжига наблюдается ярко выражен-

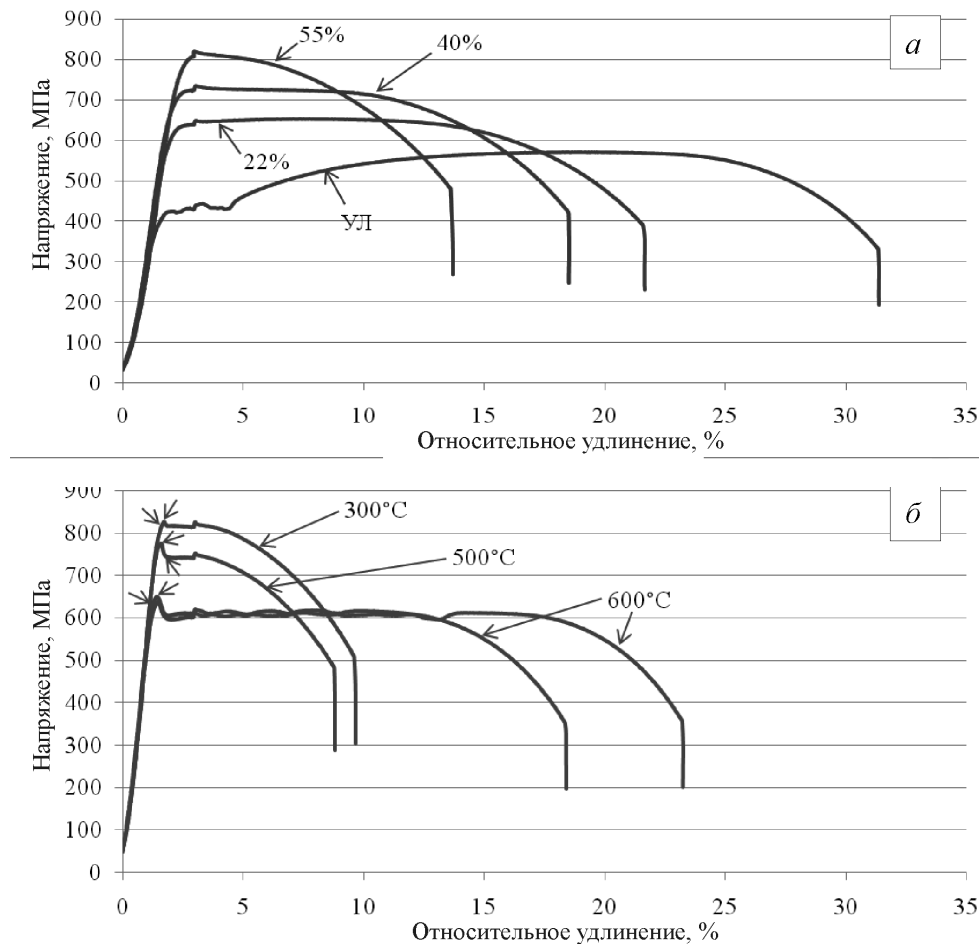


Рис. 2. Диаграммы растяжения при статическом нагружении образцов из стали 20: *а* – после улучшения (УЛ) и деформации методом радиальнойковки со степенью 22, 40, 55 %; *б* – после РК со степенью 53 % и отжига при 300, 500, 600 °С

ный «зуб» (см. рис. 2), аналогичный зубу текучести [1]. После «зуба» наблюдается небольшой почти горизонтальный участок (для отжига при 300 °С его протяженность по оси деформации составляет порядка 4 %), который можно считать и площадкой текучести, и участком очень слабого деформационного упрочнения. Такой специфический вид диаграмм растяжения позволяет говорить о том, что в данном случае верхний предел текучести и временное сопротивление разрыву практически равны.

При повышении температуры отжига до 600 °С такой вид диаграмм растяжения (с «зубом») сохраняется (см. рис. 2). Необходимо отметить, что максимальное напряжение на этом «зубе» уменьшается с увеличением температуры последеформационного отжига. При этом его величина (высота по оси напряжения) увеличивается, и наибольшая разница между максимальным и минимальным напряжением на зубе проявляется после отжига при температуре 600 °С.

Проведение последеформационного отжига при 500 °С приводит к одновременному снижению временного сопротивления разрыву, предела текучести и относительного удлинения. При этом относительное сужение и характеристики ударной вязкости несколько увеличиваются как по сравнению с деформированным состоянием, так и после проведения отжига при 300 °С (см. таблицу). Дальнейшее повышение температуры отжига приводит к снижению характеристик прочности и повышению характеристик пластичности и ударной вязкости. Так, после проведения отжига при 600 °С деформированных заготовок из стали 20 повышается предел текучести на 60 %, предел прочности на 13 %, при этом снижается относительное удлинение на 33 %, но его значение остается на достаточно высоком уровне и составляет ~20 %, относительное сужение и ударная вязкость остаются на прежнем уровне по сравнению с исходно термоулучшенным состоянием.

Выводы

1. Сравнительный анализ характеристик механических свойств стали 20 показывает, что проведение РК со степенью деформации 40 % приводит к повышению предела текучести на 69 %, предела прочности на 28 %, при этом характеристики пластичности и ударной вязкости остаются на достаточно высоком уровне: $\delta = 18,2 \%$, $\psi = 70,5 \%$, $KCU = 1,9 \text{ МДж/м}^2$ и $KCT = 1,4 \text{ МДж/м}^2$. Также изменяется вид диаграмм растяжения по сравнению с исходно термоулучшенным состоянием, на них отсутствует площадка текучести. Вследствие этого для образцов после радиальнойковки до степени деформации $\sim 40 \%$ реализуется условный предел текучести, за которым следует участок деформационного упрочнения

2. Увеличение степени деформации до 55 % приводит к повышению $\sigma_{0,2}$ на 90 %, σ_b на 45 % и снижению δ на 56 %, ψ на 15 %, KCU на 27 % и KCT на 17 % по сравнению с исходно высокоопущенным состоянием. Следует отметить, что механические характеристики после проведения радиальнойковки со степенью деформации 55 % на трубных заготовках из стали 20 находятся на достаточно высоком уровне, и составляют: $\delta = 13,5 \%$, $\psi = 65,5 \%$, $KCU = 1,6 \text{ МДж/м}^2$ и $KCT = 1,15 \text{ МДж/м}^2$.

3. Проведение последеформационного отжига при 300 °С на стали 20 приводит к достижению максимальных характеристик прочности, при этом снижается относительное удлинение образца, а относительное сужение и ударная вязкость остаются на уровне деформированного состояния. На диаграмме растяжения после такого отжига наблюдается ярко выраженный «зуб». После «зуба» наблюдается небольшой, почти горизонтальный участок (для отжига при 300 °С его протяженность по оси деформации составляет порядка 4 %), который можно считать и площадкой текучести, и участком очень слабо-

го деформационного упрочнения. Такой специфический вид диаграмм растяжения позволяет говорить о том, что в данном случае верхний предел текучести и временное сопротивление разрыву практически равны.

4. При повышении температуры отжига деформированных заготовок из стали 20 до 600 °С такой вид диаграмм растяжения (с «зубом») сохраняется. При этом повышается предел текучести на 60 %, предел прочности на 13 %, снижается относительное удлинение на 33 %, но его значение остается на достаточно высоком уровне и составляет $\sim 20 \%$, относительное сужение и ударная вязкость остаются на прежнем уровне по сравнению с исходно термоулучшенным состоянием.

5. Сравнение требований ОСТ 3-1686-80 для изделий типа «труба» на категорию прочности КС70 ($\sigma_{0,2} \geq 700 \text{ МПа}$, $\delta \geq 9 \%$, $\psi \geq 45 \%$, $KCU \geq 0,6 \text{ МДж/м}^2$) и характеристик механических свойств деформированных трубных заготовок из стали 20 со степенью деформации 55 % показало, что радиальная ковка позволяет получать высоконадежный материал для изготовления сосудов высокого давления.

Список литературы

1. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка стали. В 2-х т. – М.: Металлургия, 1968.
2. Копцева Н.В. Закономерности формирования ультрамелкозернистой структуры, обеспечивающей улучшение свойств углеродистых конструкционных сталей: дис. ... д-ра техн. наук. – Магнитогорск: МГТУ, 2012.
3. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
4. Перцев А.С., Симонов Ю.Н., Касаткин А.В., Бухалов А.Д. Формирование комплекса повышенных механических характеристик промышленных заготовок из стали 35Х методом механотермического воздействия // МиТОМ. – 2012. – № 11. – С. 11–17.

Increased mechanical properties formation on 0.2 % carbon steel by integrated mechanical and heat treatment

A.S. Pertsev, D.O. Panov, A.P. Nishta, U.N. Simonov, P.A. Popeluh, N.V. Plotnikova

The structure evolution and mechanical properties of billets of 0.2% carbon steel, processed by integrated mechanical and heat treatment, which includes the quenching and high tempering, cold radial forging and subsequent annealing in a wide temperature range, were investigated.

Key words: 0.2% carbon steel, integrated mechanical and heat treatment, cold radial forging, subsequent annealing, increased mechanical properties.