

УДК 669.14.018.29:621.643-412

А.Н. Юрченко, М.Ю. Симонов, К.А. Шибанова
A.N. Yurchenko, M.Yu. Simonov, K.A. Shibanova

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

**МЕХАНОТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА
ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 20:
СРАВНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ**

**THERMOMECHANICAL TREATMENT OIL COUNTRY TUBULAR
GOODS IN STEEL 20: COMPARISON OF MICROSTRUCTURE
AND MECHANICAL PROPERTIES**

Проведен сравнительный анализ микроструктуры и механических свойств трубных заготовок из конструкционной стали 20 после термического улучшения и деформационно-термической обработки. Проанализирован характер эволюции структуры после холодной пластической деформации методом радиальнойковки и последеформационного отжига.

Ключевые слова: радиальнаяковка, деформационно-термическая обработка, структурообразование, сталь 20, трубные заготовки.

The comparative analysis microstructure and mechanical properties oil country tubular goods in steel 20 after heat refining and deformation-heat treatment. The comparative analysis structure evolution after low temperature plastic deformation with method of radial forging and annealing after deformation was carried out.

Keywords: radial forging, deformation-heat treatment, formation of structure, steel 20, pipe billets.

В последние годы достаточно широко получили распространение методы диспергирования структур за счет холодной пластической деформации. Однако стоит отметить, что многие из них (кручение под высоким давлением (КВД) [1, 2] и равноканальное угловое прессование (РКУП) [2, 3]) являются скорее лабораторными методами моделирования структур: они не могут быть реализованы в промышленных заготовках довольно большого сечения и поэтому не находят широкого применения в машиностроении. Среди промышленных методов реализации пластической деформации для

получения дисперсных структур следует отметить штамповку обкатыванием (ШО) и радиальную ковку (РК). Схемы методов КВД, РКУП и ШО представлены на рис. 1.

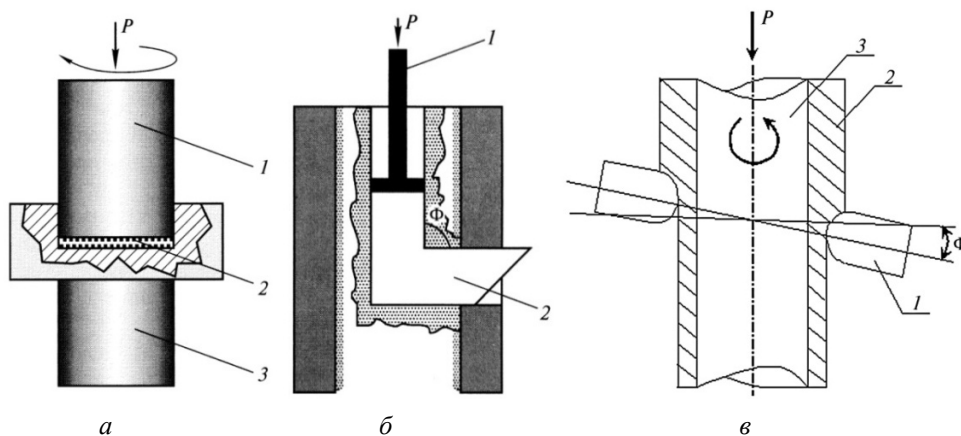


Рис. 1. Схемы проведения различных пластических деформаций:
а – кручение под высоким давлением; *б* – равноканальное угловое прессование;
в – штамповка обкатыванием; *1* – пуансон; *2* – образец; *3* – суппорт

Стоит отметить, что технология РК применяется на производстве гораздо чаще, чем ШО. Радиальную ковку применяют в основном для повышения прочности валов и трубных заготовок в исходно низкоотпущенном состоянии для получения максимально высокой прочности. Однако существует возможность получения высоковязкого состояния с повышенным уровнем прочности за счет деформации исходно высокоотпущенных заготовок с помощью РК из низколегированных или нелегированных конструкционных сталей [4, 5]. Преимуществами РК по сравнению с другими методами пластической деформации являются: высокая скорость деформации, формирование мелкозернистой и ультрамелкозернистой структур металла, возможность промышленного применения в непосредственном технологическом цикле. При использовании методов РК материал заготовки в очаге деформации находится в состоянии всестороннего равномерного сжатия посредством прерывистой высокочастотной деформации 4 бойками. Обработка поверхности заготовки осуществляется за счет многократных одновременных обжатий. Такая схема деформации позволяет получить высокую степень холодной пластической деформации (ХПД) без образования трещин в обрабатываемом материале, а локализация очага деформации в сочетании с поворотом заготовки способствует постоянному и равномерному изменению формы материала заготовки. Схема проведения радиальнойковки показана на рис. 2.

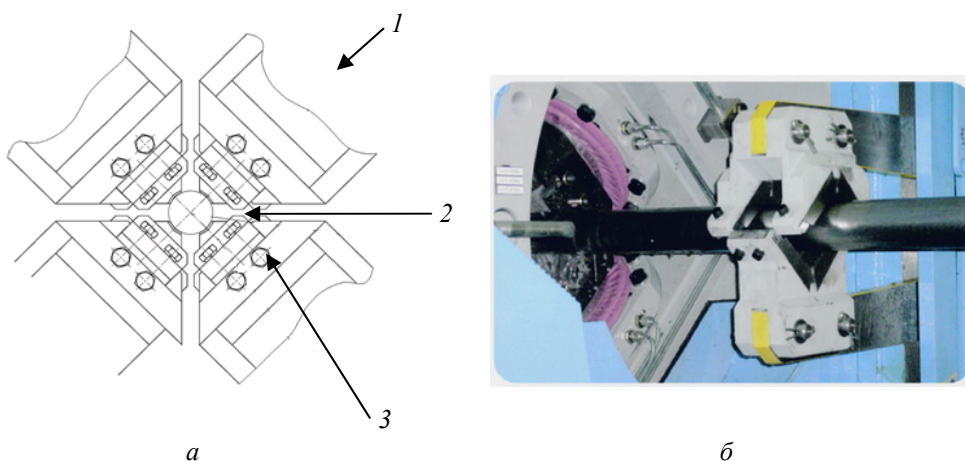


Рис. 2. Радиально-ковочная машина: *а* – схематическое изображение; *б* – реальный вид; *1* – радиально-обжимная машина; *2* – заготовка; *3* – деформирующий инструмент

Цель данной работы – анализ структуры и механических свойств трубных заготовок из стали 20 после механотермической обработки радиальной ковкой.

Материалы и методики. В исследовании принимали участие образцы, полученные из трубной заготовки конструкционной стали 20, химический состав которой представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали 20

Сталь	Содержание элементов, %								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo
20	0,24	0,25	0,39	0,022	0,012	0,22	0,18	0,15	0,14

Термическую и термомеханическую обработку проводили по следующим режимам (рис. 3):

1. Термическое улучшение (ТУ) – закалка в воде, начиная с температуры 885 °С, после чего проводился отпуск при температуре 570°С в течение 1 ч с охлаждением в воде.

2. Термически улучшенную заготовку подвергали радиальной ковке в три этапа с общей пластической деформацией $\varepsilon_{1+2+3} = 55 \%$, после чего проводили последеформационный отжиг при температуре 600°С 1 ч.

Испытания на ударную вязкость КСТ проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 9454–78 на образцах с размерами 6,5×11,5×55 мм с заранее наведенной усталостной трещиной $\lambda = 0,27$. Ударные испытания проводили на маятниковом копре КМ-30. Для наращивания трещин использовали вибратор Дроздовского.

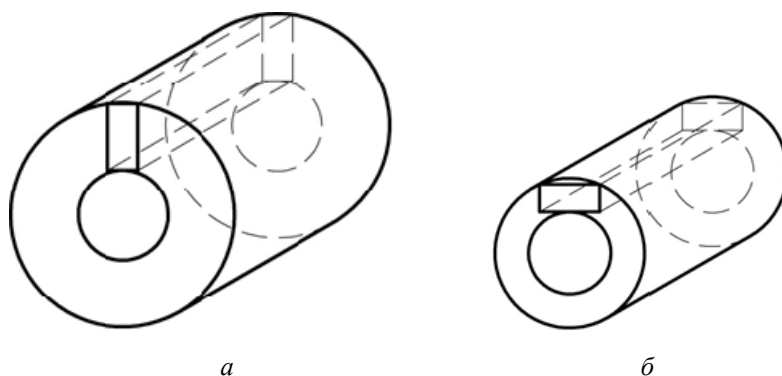


Рис. 3. Схема вырезки образцов из трубной заготовки: *a* – после термического улучшения; *б* – после термического улучшения и радиальнойковки ($\varepsilon = 55\%$)

Относительную длину трещины (λ) определяли по формуле $\lambda = \ell / b$, где ℓ – суммарная длина основного надреза и трещины; b – ширина образца.

Геометрические параметры образцов и изломов определяли с помощью стереомикроскопа Olympus SZX-16 в программном обеспечении StreamMotion 1.8 с точностью $\pm 0,05$ мм.

Ударную вязкость рассчитывали по формуле КСТ = A_p / F , где: A_p – работа разрушения, снимаемая со шкалы копра с точностью до $\pm 0,05$ кГм; F – площадь живого сечения образца, см².

Для фиксации изображений изломов использовали цифровую камеру Canon Digital IXUS-130. Полученные изображения обрабатывали с помощью программы Photoshop 7.0.

Оценку твердости исследуемых материалов проводили на твердомере ТК по методу Роквелла (шкалы *C* и *B*) в соответствии с требованиями ГОСТ 9013–59. Значение твердости определяли как среднее арифметическое по результатам 4–6 замеров. Затем полученное среднее значение твердости по таблицам переводили в твердость по Бринеллю.

Микроструктуру исследовали на шлифах, приготовленных на поперечном и продольном сечениях ударных образцов. Для травления использовали 4%-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте. Травленные микрошлифы исследовали на сканирующем электронном микроскопе FEIPHENOM G2 ProX при увеличениях от $\times 2000$ до $\times 15000$ и ускоряющем напряжении 15 кВ.

Результаты и их обсуждение. Структуру трубных заготовок из стали 20 исследовали в поперечном и продольном (осевом) направлениях. Исходной структурой трубных заготовок перед радиальной ковкой была структура высокоотпущенного мартенсита, полученная после ТУ (режим 1). Анализ световой металлографии не выявил структурных отличий в поперечном и осевом направлениях (рис. 4, *a–г*). Исследования с помощью сканирующего

электронного микроскопа (SEM) структуры в исходном состоянии показали, что пакетно-речечная морфология, полученная в результате закалки после отпуска стали 20 при температуре 570 °С, практически полностью отсутствует. Наблюдается выделение большого количества дисперсных карбидов по границам реек в виде цепочек (рис. 4, *д-е*), однако в структуре было выявлено присутствие объемов немартенситной природы различной формы: вероятнее всего, данные объемы являются бейнитом, которые образовались вследствие малой устойчивости переохлажденного аустенита.

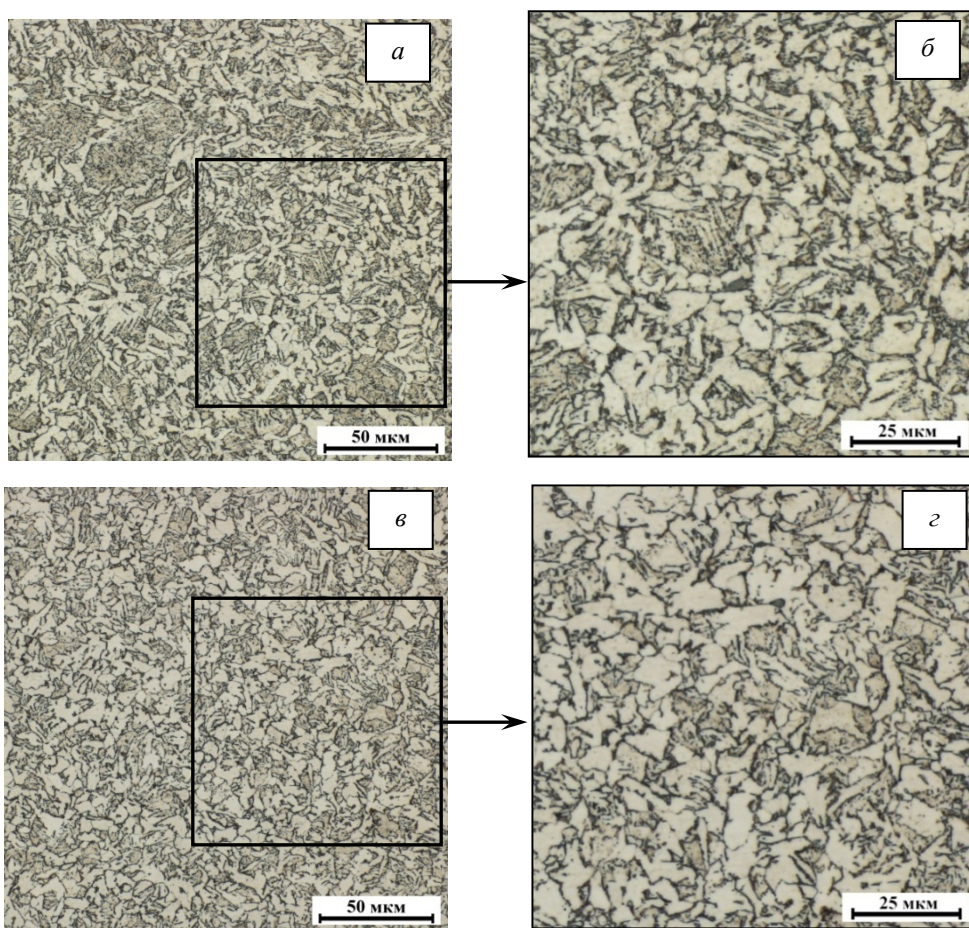


Рис. 4. Структура стали 20 в исходном состоянии: *а-б* – продольное направление; *в, г, д, е* – поперечное направление; *а, б, в, г* – световая металлография; *д, е* – сканирующая электронная микроскопия; *а, в* – увеличение $\times 500$; *б, г* – снято при увеличении $\times 500$ и масштабировано в 2 раза; *д* – увеличение $\times 15\,000$; *е* – базовое увеличение $\times 15\,000$ с дополнительным масштабированием в 2 раза (см. стр. 109)

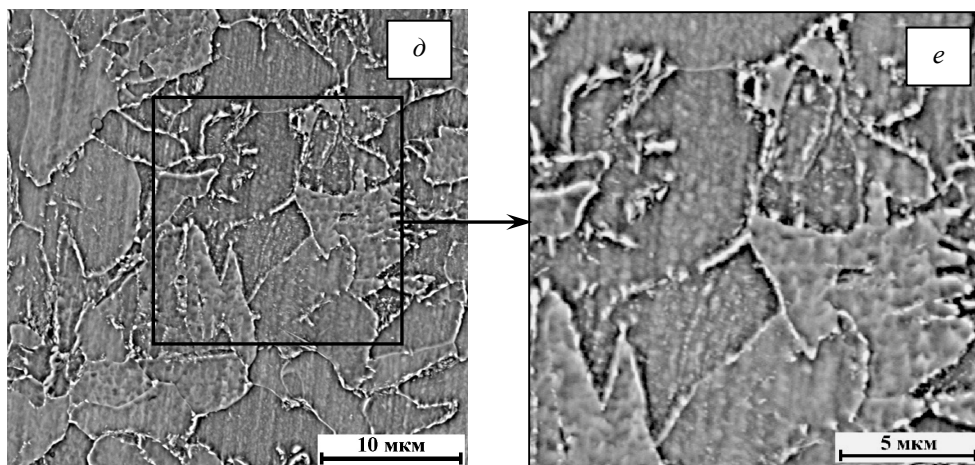


Рис. 4. Структура стали 20 в исходном состоянии: *a–б* – продольное направление; *в, з, д, е* – поперечное направление; *a, б, в, з* – световая металлография; *д, е* – сканирующая электронная микроскопия; *a, в* – увеличение $\times 500$; *б, з* – снято при увеличении $\times 500$ и масштабировано в 2 раза; *д* – увеличение $\times 15\,000$; *е* – базовое увеличение $\times 15\,000$ с дополнительным масштабированием в 2 раза

В табл. 2 представлены результаты исследования механических свойств стали 20. В исходном состоянии уровень ударной вязкости КСТ в данном структурном состоянии равен 200 Дж/см^2 , при этом предел текучести равен 400 МПа , а предел прочности 570 МПа .

Таблица 2

Механические свойства исследуемой стали 20

Режим обработки	Ударная вязкость КСТ, Дж/см ²	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	ψ	Твердость НВ
		МПа		%		
1	200	400	570	31	76,5	165
2	180	640	645	21	73,5	214

После проведения режима 2 результаты световой металлографии свидетельствуют о том, что в продольном и осевом направлениях произошло общее измельчение структуры, также в осевом направлении наблюдается вытягивание в продольном направлении трубной заготовки во время РК (рис. 5, *a–з*). Исследование структуры на сканирующем электронном микроскопе (SEM) на большом количестве полей показало у стали 20 наличие чрезвычайно однородной и высокодисперсной зеренной/субзеренной структуры с размером зерен/субзерен 1 мкм и менее (рис. 5, *д–е*). Наблюдаются также карбиды средних и малых размеров по границам зерен/субзерен и в теле зерна/субзерна.

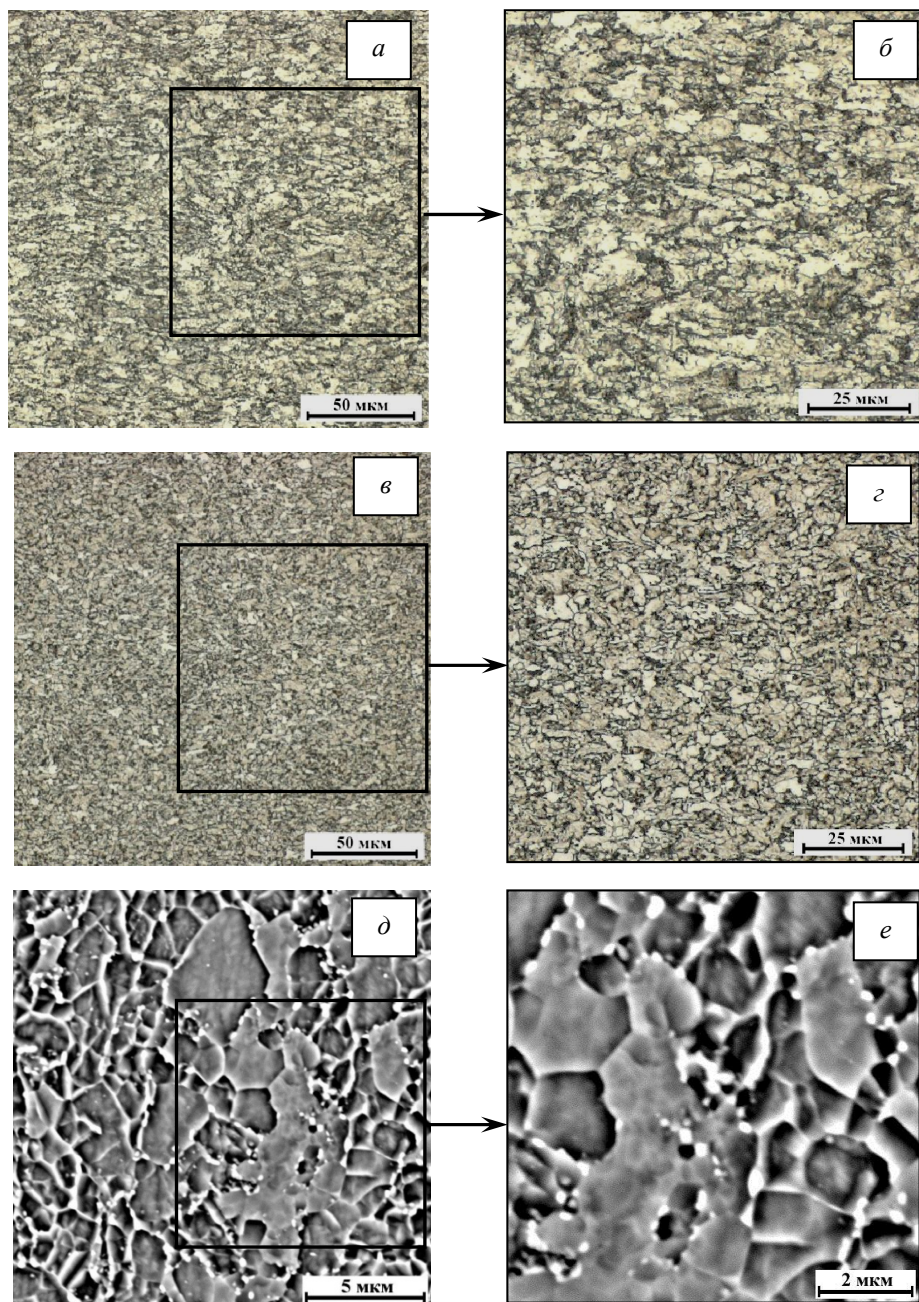


Рис. 5. Структура стали 20 после 2-го режима обработки: *a*–*б* – продольное направление; *в*, *г*, *д*, *е* – поперечное направление; *a*, *б*, *в*, *г* – световая металлография; *д*, *е* – сканирующая электронная микроскопия; *a*, *в* – увеличение $\times 500$; *б*, *г* – снято при увеличении $\times 500$ и масштабировано в 2 раза; *д* – увеличение $\times 15000$; *е* – базовое увеличение $\times 15\ 000$ с дополнительным масштабированием в 2 раза

Стоит отметить, что проведение механотермической обработки приводит к незначительному понижению ударной вязкости КСТ до 180 Дж/см², однако при этом более чем на 50 % увеличивается уровень предела текучести до 640 МПа со стабилизацией на одном уровне с пределом прочности на уровне 645 МПа. Выявлено также незначительное понижение пластичности до 21 %.

Выводы:

1. Применение пластической деформации методом холодной радикальнойковки приводит к общему диспергированию структуры.
2. После радиальнойковки происходит общее вытягивание структуры в осевом направлении.
3. В процессе реализации 2-го режима обработки происходит появление субзеренной структуры.
4. Наблюдается комплексное повышение уровня механических свойств после применения радиальнойковки и последеформационного отжига при 600 °С.

Список литературы

1. Валиев Р.З. Создание наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивные пластические деформации // Российские нанотехнологии. – 2006. – Т. 1, № 1–2. – С. 208–216.
2. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
3. Формирование структуры и механических свойств углеродистой конструкционной стали в процессе наноструктурирования методом равноканального углового прессования / Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, М.П. Барышников, О.А. Никитенко // Деформация и разрушение материалов. – 2011. – № 7. – С. 11–16.
4. Формирование комплекса повышенных механических характеристик промышленных заготовок из стали 35Х методом механотермического воздействия / А.С. Перцев, Ю.Н. Симонов, А.В. Касаткин, А.Д. Бухалов // МИТОМ. – 2012. – № 11. – С. 11–17.
5. Основы получения повышенного уровня динамической трещиностойкости и прочности в стали 35Х после холодной радиальнойковки [Электронный ресурс] / М.Ю. Симонов, А.Н. Юрченко, А.С. Перцев, Ю.Н. Симонов, Г.С. Шайманов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – URL: <http://www.science-education.ru/120-15946> (дата обращения: 25.03.2015).

Получено 04.06.2015

Юрченко Александр Николаевич – магистрант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, механико-технологический факультет, гр. МТО-1314М, e-mail: sanyaurchenko@rambler.ru.

Симонов Михаил Юрьевич – младший научный сотрудник, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, механико-технологический факультет, e-mail: mto@pstu.ru.

Шибанова Кристина Андреевна – студентка, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, механико-технологический факультет, гр. МТО-11, e-mail: mto@pstu.ru.