

УДК 620.172.224.2

ВЛИЯНИЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ И ДЕФЕКТНОСТЬ СТАЛИ

© 2013 А.М. Иванов, П.П. Петров, А.А. Платонов

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,
г. Якутск

Поступила в редакцию 25.03.2013

Рассматриваются вопросы комбинирования методов деформационной обработки: интенсивной пластической деформации по схеме равноканального углового прессования и ультразвуковой ударной обработки, а также исследования дефектной структуры конструкционной стали. Показана разная степень влияния видов обработки на дефектную структуру и ударную вязкость стали.

Ключевые слова: сталь, пластическая деформация, равноканальное угловое прессование, закалка, ультразвуковая ударная обработка, ударная вязкость, рентгеноструктурный анализ

Проблема повышения прочности и хладостойкости затрагивает вопросы создания материалов с повышенными характеристиками, которые могут быть решены производством высокопрочных хладостойких сталей или улучшением свойств материалов с исходной низкой или средней прочностью посредством формирования ультрамелкозернистой структуры. Вторая задача может быть решена деформационной обработкой. Существуют различные методы деформационной обработки, совершенствуются существующие и развиваются новые методы обработки на основе физических методов. Для улучшения эксплуатационных свойств материалов широко используются термопластические методы [1-3 и др.]. Равноканальное угловое прессование (РКУП) как метод интенсивной пластической деформации (ИПД) показало свою состоятельность в задачах формирования ультрамелкозернистой структуры, улучшения физико-механических свойств металлических материалов [4, 5 и др.]. Новые возможности в управлении свойствами материалов открывает комбинирование механических способов обработки, в том числе на стадии предварительной обработки и последующим применением электропластического воздействия [6].

Как известно, уменьшение размеров зерна сталей до субмикроструктурной структуры РКУП помимо повышения пределов прочности и текучести приводит к снижению ударной вязкости [7]. Поэтому вопрос повышения ударной вязкости материала при сохранении достигнутых прочностных характеристик имеет важное значение. Исходное состояние материала оказывает большое влияние на процесс создания дислокационной структуры, её термомеханическую стабилизацию и после последующей обработки на свойства материала. Роль предварительной обработки, предшествующей ИПД, заключается в получении равновесной структуры, изменении твердости, прочности, вязкости, пластичности, обрабатываемости, формы и величины зерна, выравнивании химического состава, снятии внутренних напряжений. Например, закалка повышает твердость и прочность, снижает вязкость и пластичность, но вместе с тем исключает мягкие ферритные включения, образуется мартенситная структура и уменьшается размер зерна. Ультразвуковая ударная обработка (УЗУО) также измельчает зерно, используется для снятия остаточных напряжений в материале, сварном соединении.

Основной процесс – ИПД по схеме РКУП существенно измельчает зерно за счет сдвиговой деформации в месте пересечения каналов прессования, повышает твердость и прочность [9]. Постдеформационный (после ИПД) отжиг при разных температурах позволяет снимать внутренние напряжения и способствует повышению пластичности стали при

Иванов Афанасий Михайлович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. E-mail: a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru

Петров Петр Петрович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник. E-mail: ppp32@mail.ru

Платонов Анатолий Андреевич, научный сотрудник. E-mail: aplatonov@iptpn.ysn.ru

некотором снижении прочности. При этом можно добиться того, чтобы достигнутый мелкий размер зерна сохранялся или увеличивался незначительно, прочность была выше, чем для исходного состояния, а пластичность была сопоставима с исходным.

В настоящей статье представлены варианты комбинации способов обработки: закалки и РКУП; закалки, РКУП и УЗУО для изменения механических свойств сталей. Приводятся результаты по ударной вязкости и данные рентгеноструктурного анализа.

Материал и методика исследования. Исследована конструкционная низкоуглеродистая сталь ВСт3сп (0,17 С, 0,2 % Si, 0,54 % Mn, 0,14 % Cr, 0,14 % Ni и 0,25 % Cu, остальное Fe). Химический анализ проведен на атомно-эмиссионном спектрометре «Foundry-Master»

фирмы «Worldwide Analytical Systems AG (WAS AG)». Сталь имеет ферритно-перлитную структуру. Для определения ударной вязкости сталей были изготовлены образцы Менаже согласно ГОСТ 9454-78. Испытания на ударный изгиб проведены на маятниковом копре «МК-30» при комнатной температуре. Осуществлялась УЗУО поверхностей образцов из стали ВСт3сп в исходном состоянии, после закалки и РКУП [8]. Часть заготовок была подвергнута закалке в воде от $T=1153$ К, а затем РКУП в 2 прохода по маршруту С при температуре 673 К и угле пересечения каналов $\Psi=120^\circ$. Партия заготовок в исходном состоянии, а также после ТО и РКУП была подвергнута УЗУО в зоне концентрации напряжений (рис. 1).

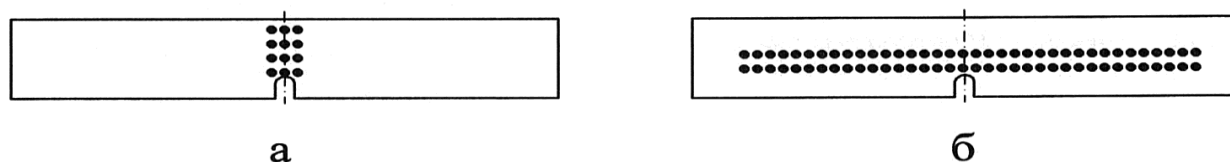


Рис. 1. Схемы упрочнения образцов УЗУО

Режимы обработки образцов представлены в таблице 1. Был использован ультразвуковой технологический комплекс, включающий УЗ генератор «УЗГТ 0.5/27» и технологическую оснастку типа «Шмель» (диапазон рабочих частот

– 23-29 кГц, тип УЗ преобразователя – магнито-стрикционный). Упрочняющая обработка поверхности образца осуществлялась методом поверхностного пластического деформирования материала на УЗ частоте.

Таблица 1. Режимы ультразвуковой ударной обработки образцов

№ режима	Режим обработки
1	Исходное состояние – состояние поставки
2	УЗУО образца в исходном состоянии по схеме 1.а в течение 10 сек. с каждой стороны
3	УЗУО образца в исходном состоянии по схеме 1.б в течение 20 сек. с каждой стороны
4	Закалка с 1153 К в воде + РКУП по маршруту С при 673 К при $\Psi=120^\circ$ в 2 цикла
5	Закалка с 1153 К в воде + РКУП (С, 673 К, $\Psi=120^\circ$, $n=2$) + УЗУО образца по схеме 1.а в течение 10 сек. с каждой стороны
6	Закалка с 1153 К в воде + РКУП (С, 673 К, $\Psi=120^\circ$, $n=2$) + УЗУО по схеме 1.б в течение 20 сек. с каждой стороны

Измерения параметра кристаллической решетки и плотности дислокаций проводили на высокоточном порошковом рентгеновском дифрактометре «Ultima IV» фирмы «Rigaku» в излучении $\text{Co}_{K\alpha}$ (длина волны $\lambda=1,790255 \text{ \AA}$). Съемка проведена по схеме Брегга-Брентано со сцинтилляционным детектором. Ширина щели, ограничивающей падающий пучок по горизонтали, равна 10 мм, по вертикали $0,5^\circ$; ширина щели Соллера на падающем и дифрагированном пучке составляет 5° ; ширина щели, ограничивающей дифрагированный пучок по вертикали перед приемной щелью, $0,5^\circ$. Рабочий режим: $U=40 \text{ кВ}$, $I=40 \text{ мА}$, скорость сканирования $1,67 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ \cdot \text{с}^{-1}$, шаг сканирования $0,01^\circ$, ось сканирования $2\theta/\theta$. Для расшифровки дифрактограмм использовалась международная база дифракционных данных «PDXL-2».

Инструментальное уширение регистрировалось экспериментально с помощью съемки в тех же условиях эталонного образца, в котором физическое уширение близко к нулю ($D > 0,15 \text{ мкм}$, $\rho < 10^{12} \text{ м}^{-2}$). Эталон изготовлен из материала рабочих образцов проведением рекристаллизационной обработки (образец из стали ВСтЗсп, отожженный в вакууме при 1073 К, выдержка 2 часа, имеющий наименьшую полуширину рентгеновской линии). Расчет параметров тонкого кристаллического строения – микродеформации и размеров блоков выполнили, используя метод аппроксимации [10]. Рентгенографический метод определения плотности дислокаций основан на анализе уширения профилей дифракционных пиков [11]. С целью получения профиля рентгеновской линии, отвечающей плоскостям с задними углами отражения, выбрана плоскость $(hkl) = (220)$. Плотность дислокаций (ρ , 10^{14} м^{-2}) рассчитывалась по уширению рефлекса (220) согласно работам [10, 12].

Результаты исследований и их обсуждение. Закалка и РКУП приводят к снижению значений KCU примерно на 30%. УЗУО при данных режимах оказывает незначительное влияние на ударную вязкость: снижение до 10% для исходного материала и до 20% для образцов, подвергнутых закалке и РКУП (рис. 2). Незначительное влияние УЗУО на ударную вязкость связано с тем, что этот вид обработки оказывает влияние на структуру приповерхностного слоя материала, тогда как РКУП изменяет структуру по объему материала. Как видно из результатов, некоторая разница во влиянии схемы приложения УЗ ударного воздействия на значения ударной вязкости имеется.

$KCU \times 10^4, \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$

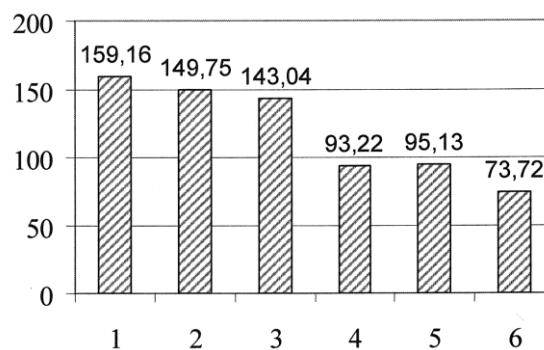


Рис. 2. Ударная вязкость KCU стали ВСтЗсп, подвергнутой ТО, РКУП и УЗУО (обозначения в таблице 1)

Рентгеноструктурный анализ стали ВСтЗсп выявил значительное различие профилей рентгеновских линий в режиме обработки УЗУО (режим №2 в табл. 1) и по режиму обработки в последовательности «закалка + РКУП + УЗУО» (режим №5) (рис. 3). Профили линии от стали ВСтЗсп после режима «закалка+РКУП+УЗУО» менее интенсивны и сильно уширены (рис. 3г, д). Скалярная плотность дислокаций (ρ) в стали, подвергнутой УЗУО, составляет $4,55 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ в основном металле, а в зоне УЗУО $2,68 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ (табл. 2). После закалки + РКУП + УЗУО (ρ) составляет $8,32 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ в основном металле, а в зоне обработки достигает $8,13 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$. Скалярная плотность дислокаций в режиме обработки УЗУО, как в основном металле, так и в зоне обработки существенно не отличаются, однако ниже, чем после режима «закалка + РКУП + УЗУО». Существенных отличий в плотностях дислокаций после режима «закалка + РКУП + УЗУО», как в основном металле, так и в зоне УЗУО не наблюдается, однако выше, чем после испытаний образцов стали в режиме УЗУО. Таким образом, после РКУП в состоянии деформационного упрочнения обработка поверхности материала методом УЗУО существенных изменений в дефектной микроструктуре и напряженно-деформированном состоянии не вносит. Режим обработки №5 (табл. 2) приводит к увеличению физического уширения β линий стали ВСтЗсп относительно режима обработки по режиму №2, что характеризует протекание больших пластических деформаций, сопровождающихся нарастанием дефектной микроструктуры и измельчением зерен.

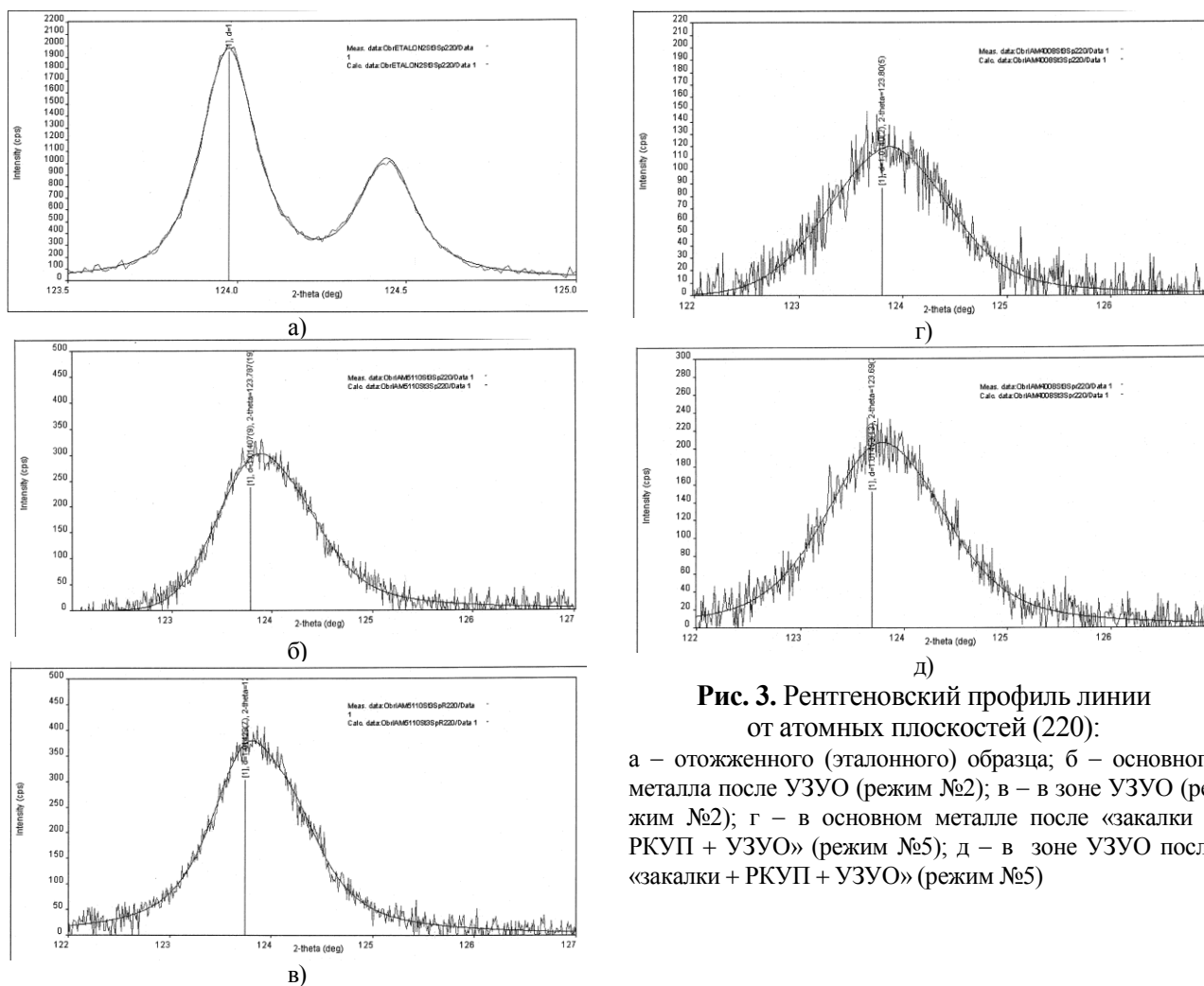


Рис. 3. Рентгеновский профиль линии от атомных плоскостей (220):

а – отожженного (эталонного) образца; б – основного металла после УЗУО (режим №2); в – в зоне УЗУО (режим №2); г – в основном металле после «заковки + РКУП + УЗУО» (режим №5); д – в зоне УЗУО после «заковки + РКУП + УЗУО» (режим №5)

Таблица 2. Данные рентгеноструктурного анализа стали ВСтЗсп после УЗУО исходного образца и заковки + РКУП + УЗУО

№	Режим обработки	β , ° осн. металл	a , Å	$\rho \cdot 10^{14}$, м ⁻² осн. металл	β , ° зона УЗУО	a , Å	$\rho \cdot 10^{14}$, м ⁻² зона УЗУО
1	эталон	0,197	2,8677	—	—	—	—
2	режим 2	0,910	2,8701	4,55	0,857	2,8708	2,68
3	режим 5	1,23	2,8700	8,32	1,22	2,8715	8,13

Уширение рентгеновских линий β в феррито-перлитной стали ВСтЗсп возрастает с деформацией в случае РКУП как в основном металле, так и в зоне УЗУО. Следует отметить, что для феррито-перлитной стали при деформировании наблюдается максимальное относительное увеличение физического уширения по сравнению с исходным состоянием (табл. 2). После РКУП структура становится существенно неравновесной, что подтверждается размытием, увеличением асимметричности и уменьшением интенсивности профилей рентгеновских линий. Все это свидетельствует о высоком уровне внутренних напряжений и сильном измельчении кристаллитов.

Выводы: сочетанием различных видов обработки и варьированием режимов комбинированной обработки можно регулировать состояние и ударную вязкость сталей. При рассмотренных режимах УЗУО оказывает незначительное влияние на ударную вязкость. Основной вклад в повышение прочности стали вносят зернограничное упрочнение за счет измельчения зерен при РКУП и увеличение плотности дислокаций. УЗУО поверхности стали ВСтЗсп после РКУП существенных изменений в дефектной структуре и напряженно-деформированном состоянии не вносит.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта по Программе №III.28.1 СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Иванова, В.С.* Новые пути повышения прочности металлов / *В.С. Иванова, Л.К. Гордиенко.* – М.: Наука, 1964. 118 с.
2. *Бернштейн, М.Л.* Термомеханическая обработка металлов и сплавов. Т.1. – М.: Металлургия, 1968. 596 с.
3. *Григорьев, А.К.* Термомеханическое упрочнение стали в заготовительном производстве / *А.К. Григорьев, Г.Е. Коджаспиров.* – М.: Машиностроение, ЛО., 1985. 143 с.
4. *Сегал, В.М.* Процессы пластического структурообразования металлов / *В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов* и др. – Минск: Навука і тэхніка, 1994. 231 с.
5. *Валиев, Р.З.* Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / *Р.З. Валиев, И.В. Александров.* – М.: ТКЦ «Академкнига», 2007. 398 с.
6. *Иванов, А.М.* Комбинирование методов интенсивной пластической деформации конструкционных сталей / *А.М. Иванов, У.Х. Угурчиев, В.В. Столяров* и др. // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2012. №6. С. 54-57.
7. *Ботвина, Л.Р.* Особенности статического, ударного и усталостного разрушения стали 06МБФ с субмикрокристаллической структурой / *Л.Р. Ботвина, М.Р. Тютин, В.П. Левин* и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74. № 1. С. 43-49.
8. *Иванов, А.М.* Комбинирование методов обработки – эффективный способ управления ударной вязкостью сталей / *А.М. Иванов, Е.С. Лукин* // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14, № 4(5). С. 1239-1242.
9. *Петрова, Н.Д.* Прочность и структурно-фазовое состояние сталей после интенсивной пластической деформации и термической обработки / *Н.Д. Петрова, П.П. Петров, А.А. Платонов, А.М. Иванов* // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2010. №2. С. 28-36.
10. *Горелик, С.С.* Рентгенографический и электронно-оптический анализ / *С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Распоргуев.* – М.: МИСиС, 2002. 360 с.
11. *Кривоглаз, М.А.* Дифракция рентгеновских лучей и нейтронов в неидеальных кристаллах. – Киев, «Наукова Думка», 1983. 408 с.
12. *Уманский, Я.С.* Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / *Я.С. Уманский, Ю.А. Скаков, А.Н. Иванов, Л.Н. Распоргуев.* – М.: Металлургия, 1982. 632 с.

INFLUENCE OF EQUAL-CHANNEL ANGULAR PRESSING AND ULTRASONIC SHOCK PROCESSING ON THE IMPACT STRENGTH AND DEFECTIVE STRUCTURE OF STEEL

© 2013 A.M. Ivanov, P.P. Petrov, A.A. Platonov

Institute of Physical and Technical Problems of the North named after V.P. Larionov
SB RAS, Yakutsk

The questions of combination the methods of deformation processing are considered: intensive plastic deformation according to scheme of equal-channel angular pressing and ultrasonic shock processing, and also research the defective structure of constructional steel. Different extent of influence of processing types on defective structure and impact strength of steel is shown.

Key words: *steel, plastic deformation, equal-channel angular pressing, hardening, ultrasonic shock processing, impact strength, X-ray diffraction analysis*

Afanasiiy Ivanov, Candidate of Technical Sciences, Leading Research Fellow. E-mail: a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru
Petr Petrov, Candidate of Physics and Mathematics, Leading Research Fellow. E-mail: ppp32@mail.ru
Anatoliy Platonov, Research Fellow. E-mail: aplatonov@iptpn.ysn.ru