

## **ВЛИЯНИЕ ДЕГРАДАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ДЕФЕКТНОСТЬ ТРУБНОЙ СТАЛИ\***

***П.П. Петров, А.М. Иванов, А.А. Платонов***

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН»  
677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1

E-mail: aplatonov@iptpn.ysn.ru

*Рассмотрено влияние деградационных процессов в результате длительной эксплуатации и интенсивной пластической деформации (ИПД) на изменение структуры, параметра кристаллической решетки и плотности дислокаций в трубной стали ВСтЗсп. Показано, что длительная эксплуатация трубы вносит свой вклад в развитие деградационных процессов в кристаллической структуре и изменяет механические свойства материала.*

**Ключевые слова:** *сталь, структура, зерно, прочность, микротвердость, параметр кристаллической решетки, плотность дислокаций, деградация, интенсивная пластическая деформация, равноканальное угловое прессование, рентгеноструктурный анализ, дифрактограмма.*

### **Введение**

Как известно, дефектность оказывает существенное влияние на физико-механические свойства стали. В свою очередь дефектность материала может быть обусловлена разными причинами. Одними из факторов, влияющими на дефектность, могут быть деградация материала в результате эксплуатации в сложных условиях, а также термомеханическое воздействие на него.

Исследованию возникновения и развития различных дефектов, их влияния на свойства материалов посвящено множество работ исследователей [1, 2]. Деградационные процессы в материалах влияют на параметры технического состояния конструкций. При этом процесс изменения механических характеристик в том или ином направлении может отражать разупрочнение, упрочнение и охрупчивание металла. Металлическая конструкция может быть подвергнута термомеханическому воздействию на разных стадиях – при изготовлении, транспортировке, монтаже и эксплуатации. То есть имеют место технологические и эксплуатационные факторы влияния на физико-механические свойства металла. При механическом воздействии в результате пластической деформации (наклепа) может произойти охрупчивание металла за счет увеличения плотности дефектов кристаллической решетки – дислокаций и закрепления подвижных линейных дефектов (дислокаций) атомами внедрения типа углерода или азота.

Исследование влияния усталости и термопластического воздействия на структуру и дефектность металлических материалов имеет научное и практическое значе-

---

\*Работа выполнена по проекту III.20.3.3. Программы фундаментальных исследований СО РАН III.20.3.

*Петр Петрович Петров (к.ф.-м.н.), ведущий научный сотрудник.  
Афанасий Михайлович Иванов (к.т.н.), ведущий научный сотрудник.  
Анатолий Андреевич Платонов, научный сотрудник.*

ние. Представляет интерес изучение влияния ИПД на дефектность стали, поскольку цель таких обработок – изменение служебных свойств материала. Одним из методов интенсивной пластической деформации, оказывающим существенное влияние на состояние материала, является равноканальное угловое прессование (РКУП). Следует отметить, что вопрос влияния длительной эксплуатации и РКУП на дефектность в конструкционных сталях ферритно-перлитного класса остается малоизученным. Для эффективного применения таких материалов необходимо комплексное изучение их свойств, исследование изменения структурных искажений и развития дефектов.

В настоящей работе рассмотрены вопросы исследования структуры, определения прочности и рентгеноструктурного анализа трубной стали ВСтЗсп после длительной эксплуатации и интенсивной пластической деформации и термической обработки.

### **Материал и методика исследования**

Исследовалась сталь ВСтЗсп из трубы аварийного запаса (складское хранение) и после эксплуатации в системе магистрального газопровода в течение 42 лет. Газопровод диаметром 273 мм и толщиной стенки 8 мм используется для перекачки газа по маршруту Якутск – Покровск в Республике Саха (Якутия). В результате воздействия различных факторов и усталости структура металла изменяется, материал охрупчивается, снижается пластичность и т. д.

Химический состав низкоуглеродистой стали ВСтЗсп, %: С – 0,17; Si – 0,2; Mn – 0,54; Cr – 0,14; Ni – 0,14; Cu – 0,25; остальное – Fe. Химический анализ стали проведен на атомно-эмиссионном спектрометре Foundry-Master фирмы Worldwide Analytical Systems AG (WAS AG). Исходная микроструктура неиспользованной стали – ферритно-перлитная полосчатая.

Заготовки из новой трубы и трубы после 42 лет эксплуатации были подвергнуты РКУП по маршруту С (поворот заготовки относительно ее продольной оси перед каждым последующим циклом прессования на угол 180°) в 4 прохода при температуре прессования 673 К. Для реализации РКУП с помощью гидравлического пресса ПСУ 125 типа ЗИМ с максимальным усилием 1250 кН использовалась специальная оснастка с углом пересечения каналов 120°. Поскольку в технологической оснастке диаметр каналов составляет 20 мм, а толщина стенки трубы 8 мм, выполнялось прессование составной заготовки.

Микроструктуру выявляли травлением шлифов в 4%-м спиртовом растворе азотной кислоты. Исследования структуры проводили на оптическом микроскопе Neophot-32 (Carl Zeiss Jena). Был выполнен количественный металлографический анализ.

Измерения микротвердости проводили методом Виккерса на микротвердомере LM-700 при нагрузке 0,1 Н и времени выдержки 15 сек. Значения микротвердости рассчитывали по известной формуле. Испытание образцов одноосным растяжением проводилось на испытательной машине Instron-1195 при постоянной скорости нагружения, равной  $\approx 3,33 \cdot 10^{-5}$  м·с<sup>-1</sup>.

Методом рентгеноструктурного анализа стали ВСтЗсп определяли величину параметра решетки и плотность дислокаций. Для исключения влияния на результаты исследований структурных искажений, неизбежно возникающих в процессе изготовления, обработки и эксплуатации изделия, был изготовлен эталонный образец (отжиг в вакуумной печи при  $T = 873$  К в течение 1 часа).

Измерения параметра кристаллической решетки и плотности дислокаций проводили на дифрактометре отечественного производства ДРОН-3М с использованием

Ст-излучения в режиме  $U = 30$  кВ,  $I = 20$  мА. Интервал углов  $154,00^\circ - 158,30^\circ$ . Скорость сканирования 1 град/мин с шагом 0,02. Измерение плотности дислокаций проводили на основе анализа профилей брегговских максимумов [3]. Критерием оценки изменения структурного состояния сталей в процессе их получения служила ширина рентгеновских линий, так как дефекты кристаллического строения проявляются в эффектах уширения линий. Использование величины физического уширения рентгеновских линий, которое обуславливается плотностью и распределением дислокаций в металле, обосновано в качестве объективной оценки дефектности кристаллической решетки [3, 4]. Фиксировались рефлексы от атомных плоскостей/ Исключение геометрического фактора дифрагированных образцов при вычислении физического уширения исследуемых материалов проводилось по рефлексу эталонного отожженного образца, имеющему наименьшую полуширину. Плотность дислокаций  $\rho$  рассчитывалась по уширению рефлекса согласно [3, 6].

### Результаты исследований и их обсуждение

Было проведено исследование микроструктуры трубной стали до и после эксплуатации в исходном состоянии и после РКУП.

Исходная микроструктура неэксплуатированной (из аварийного запаса) стали – ферритно-перлитная полосчатая. В процессе эксплуатации стальных трубопроводов в материале трубы происходит перестройка дислокационной структуры и незначительное уменьшение размера зерна ( $d = 6,15$  мкм) по сравнению с неэксплуатированной трубой ( $d = 10,17$  мкм). РКУ-прессование неэксплуатированной стали приводит к более однородному распределению перлита в ходе интенсивной пластической деформации, а также к измельчению зерна ( $d = 3,64$  мкм). Формирование мелкозернистой структуры происходит согласно схеме эволюции микроструктуры при ИПД. Интенсивная пластическая деформация использованной стали приводит к мелкозернистой структуре ( $d = 4,06$  мкм), существенно не отличающейся от образцов после РКУП стали из трубы аварийного запаса.

После длительной эксплуатации микротвердость стали уменьшилась на 45 % в результате структурных изменений. РКУП повышает микротвердость в 1,65 – 2,1 раз, поскольку при этом происходит измельчение зерен и некоторое увеличение плотности дислокаций. Если материал трубы СтЗсп после длительной эксплуатации прочность практически сохраняет (предел текучести до и после эксплуатации – 351,2 и 353,4 МПа соответственно; предел прочности – 490,6 и 479 МПа соответственно), то пластичность материала существенно падает – почти на 25 % (остаточное удлинение 21,47 % до и 16,16 % после эксплуатации соответственно).

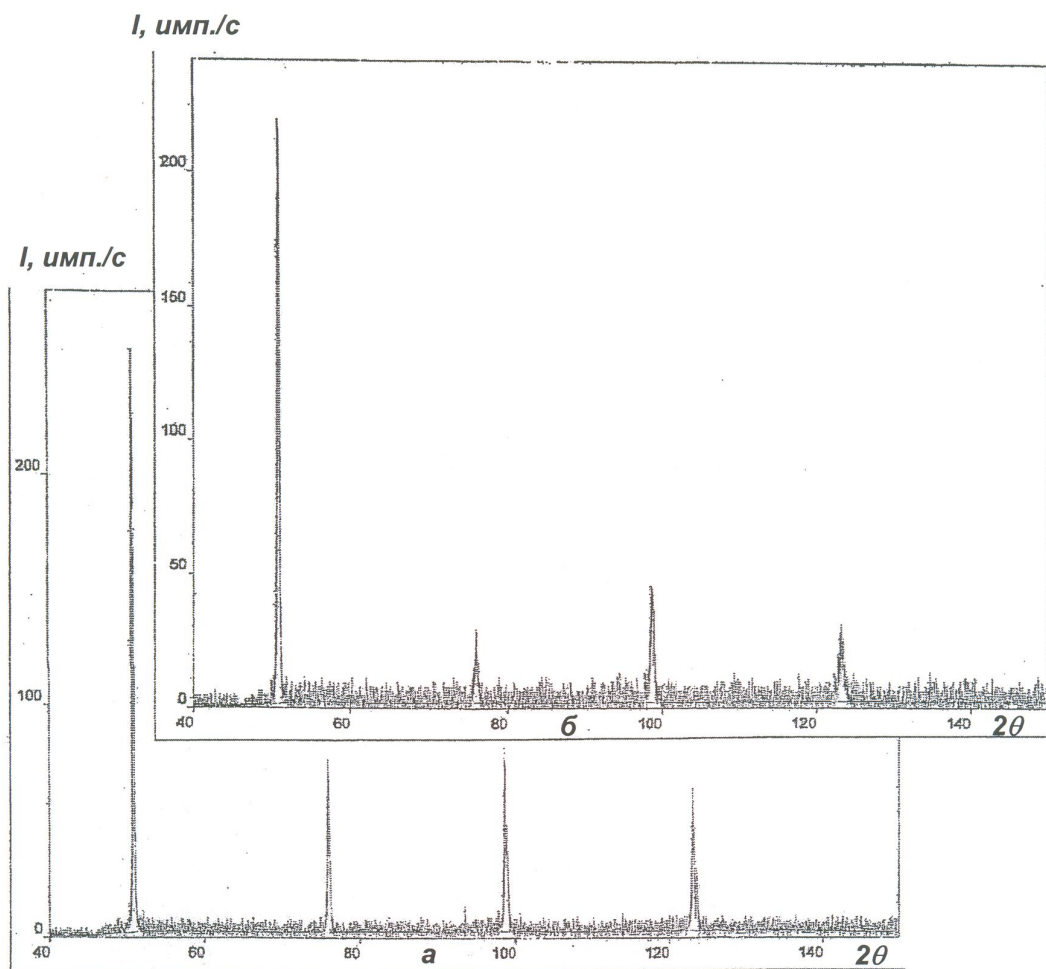
Данные рентгеноструктурного анализа представлены в таблице. Деградиционные изменения в тонкой структуре оказывают существенное влияние на параметр решетки. Влияние ИПД на параметр решетки стали из новой трубы и трубы после эксплуатации различное.

Изменение параметра кристаллической решетки  $\Delta a$  для образца из неиспользованной трубной стали ВСтЗсп относительно эталонного (отожженного) образца незначительное, что характеризует состояние поставки. Увеличение  $\Delta a$  в случае образца из неиспользованной стали, которая была подвергнута РКУП по маршруту С при температуре  $T = 673$  К в  $n = 4$  прохода, свидетельствует о больших растягивающих пластических деформациях вдоль плоскости скольжения. Максимальное значение  $\Delta a$  в сторону уменьшения на образце из трубной стали ВСтЗсп после длительной эксплуатации, подвергнутой при тех же режимах РКУП, характеризует протекание больших пластических деформаций сжатия, когда в материале уже произошли необ-

ратимые деградационные изменения в тонкой структуре в результате процесса старения, т. е. на неустойчивую структуру воздействуют внешние сжимающие усилия.

### Данные рентгеноструктурного анализа трубной стали ВСтЗсп

№	Состояние материала	$a \cdot 10^{-5}$ , м	$\rho \cdot 10^{11}$ , м <sup>-2</sup>	Фактор асимметричности	$2\theta$
1	Эталон	28782	–	0,49	156,04
2	Новая трубная сталь	28775	8,2188	0,8	155,96
3	РКУП новой трубной стали (С, Т = 673 К, n = 4)	28792	146,5031	0,21	156,22
4	Трубная сталь после эксплуатации	28767	40,9059	2,1	155,94
5	РКУП (С, Т = 673 К, n = 4) трубной стали после эксплуатации	28763	160,9840	0,85	154,94



Р и с. 1. Сравнительный вид дифрактограмм стали ВСтЗсп:  
а – новая трубная сталь; б – трубная сталь после длительной эксплуатации и РКУП

Высокие значения плотности дислокаций являются характерными для материалов, подвергнутых большим пластическим деформациям, – это образцы № 3 и 5 (см. таблицу). Анализ результатов показал следующее. В упрочненном материале (образцы № 3 и 5) закономерно существенно высокие плотности дислокаций. Увеличение фактора асимметричности формы профиля дифракционной линии от 0,49 в случае эталона до 0,85 в образце № 5 и 2,1 в образце № 4 свидетельствует о протекании больших пластических деформаций и об искаженности и неоднородности дефектной структуры (рис. 1). Причем длительная эксплуатация материала вносит свой вклад в эволюцию деградационных процессов в кристаллической структуре, которые протекают при воздействии на материал больших пластических деформаций, в частности при испытании образцов в одних и тех же условиях (образцы № 3 и 5) величина плотности дислокаций в упрочненной после длительной эксплуатации стали (образец № 5) больше.

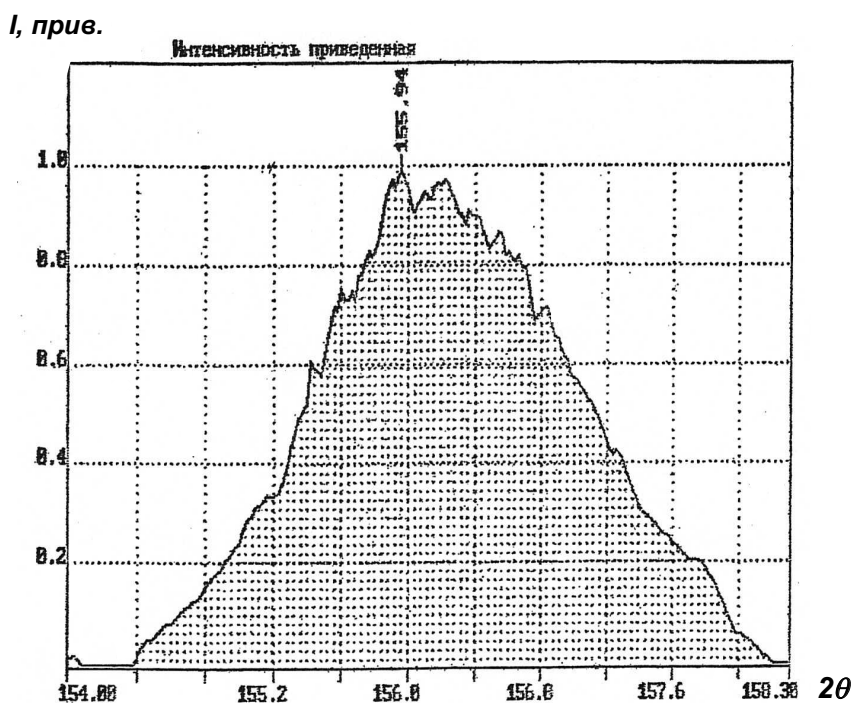


Рис. 2. Дифрактограмма стали ВСтЗсп после длительной эксплуатации и РКУП

Наиболее сильные изменения в структуре произошли в упрочненной стали (образец № 5), которая была подвергнута РКУП после длительной эксплуатации, т. е. наблюдается максимальное смещение максимума угла дифракции  $2\theta$  относительно других образцов. Величина смещения достигает в данном случае  $\Delta 2\theta = -1,1^\circ$  относительно эталонного образца, что характеризует наличие больших остаточных напряжений. Для данного образца № 5 по сравнению с образцами № 2, 3 и 4 профиль рентгеновской дифракционной линии, полученный от плоскостей отражения, имеет значительную размытость и наибольшую полуширину линии ( $B = 0,67^\circ$ ), тогда как на образцах № 2 и 4 полуширина линии  $B = 0,26^\circ$  и  $B = 0,30^\circ$  соответственно. А раз-

мытие профиля рентгеновской линии (рис. 2) отражает наличие в образце № 5 большой степени линейных и объемных неоднородностей структуры [2], обусловленных большими пластическими деформациями [7].

### Заключение

Таким образом, длительная эксплуатация трубы вносит свой вклад в развитие деградационных процессов в кристаллической структуре и изменяет механические свойства материала.

В процессе эксплуатации в материале трубы происходит перестройка дислокационной структуры и незначительное уменьшение размера зерна по сравнению с неэксплуатированной трубой. Равноканальное угловое прессование неэксплуатированной стали приводит к более однородному распределению перлита в ходе интенсивной пластической деформации, а также к измельчению зерна.

После длительной эксплуатации микротвердость стали в результате структурных изменений значительно уменьшилась. Равноканальное угловое прессование существенно повысило микротвердость за счет измельчения зерен и увеличения плотности дислокаций. В результате равноканального углового прессования закономерно повышается прочность и снижается пластичность.

Данные рентгеноструктурного анализа свидетельствуют о протекании больших пластических деформаций и об искаженности и неоднородности дефектной структуры в разной степени в зависимости от состояния материала трубы. После РКУП при одних и тех же условиях плотность дислокаций для деградированной стали выше, чем для новой. О наиболее сильных изменениях в структуре в использованной стали после упрочнения свидетельствует и максимальное смещение максимума угла дифракции  $2\theta$ .

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Филиппов Г.А., Ливанова О.В.* Деградация свойств металла труб при длительной эксплуатации магистральных трубопроводов // *Сталь*. – 2003. – № 2. – С. 84-87.
2. *Махутов Н.А., Пермяков В.Н., Кравцова Ю.А., Ботвина Л.Р.* Оценка состояния материала продуктопровода после его длительной эксплуатации // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2007. – Т. 73. – № 2. – С. 54-57.
3. *Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я.С. Уманский, Ю.А. Скаков, А.Н. Иванов, Л.Н. Расторгуев.* – М.: Металлургия, 1982. – 632 с.
4. *Кривоглаз М.А.* Теория рассеяния рентгеновских лучей и тепловых нейтронов реальными кристаллами. – М.: Наука, 1967. – 336 с.
5. *Иванов А.Н., Меженный Ю.О., Остров А.Е., Фомичева Е.И.* Сравнительное определение плотности дислокаций в поликристаллах по ширине рентгеновских линий и электронно-микроскопически // *Заводская лаборатория*. – 1987. – Т. 53. – № 2. – С. 43-48.
6. *Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н.* Рентгенографический и электронно-оптический анализ. – М.: МИСиС, 2002. – 360 с.
7. *Рыбин В.В.* Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 223 с.

*Статья поступила в редакцию 26 ноября 2012 г.*

# INFLUENCE OF DEGRADATION PROCESSES AND SEVERE PLASTIC DEFORMATION ON DEFECTIVE OF PIPE STEEL

*P.P. Petrov, A.M. Ivanov, A.A. Platonov*

Federal State Institution of Science

«Institute of Physical and Technical Problems of the North it V.P. Laronov, Russian Academy of Sciences»

1, October st., Yakutsk, 677980

*The influence of degradation processes as a result of continuous operation, and severe plastic deformation (SPD) on the change of structure, the crystal lattice parameter and the dislocation density in the pipe steel VSt3sp is considered. The long-term operation of the pipe contributes to the development of degradation processes in the crystal structure and modifies the mechanical properties of the material is shown.*

**Keywords:** *steel, structure, grain, strength, microhardness, crystal lattice parameter, dislocation density, degradation, severe plastic deformation, equal channel angular pressing, X-ray diffraction analysis, the diffractogram.*

---

*Petr P. Petrov, Leading Research Scientist.*

*Afanasy M. Ivanov, Leading Research Scientist.*

*Anatoliy A. Platonov, Research Scientist.*