

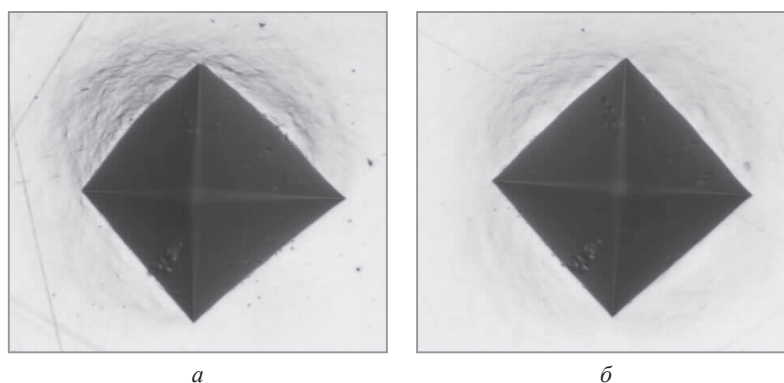


Рис. 4. Вид отпечатка при измерении твердости по Виккерсу: *а* – при неудовлетворительной подготовке металлографического шлифа («завал»); *б* – при удовлетворительной обработке металлографического шлифа. $\times 100$

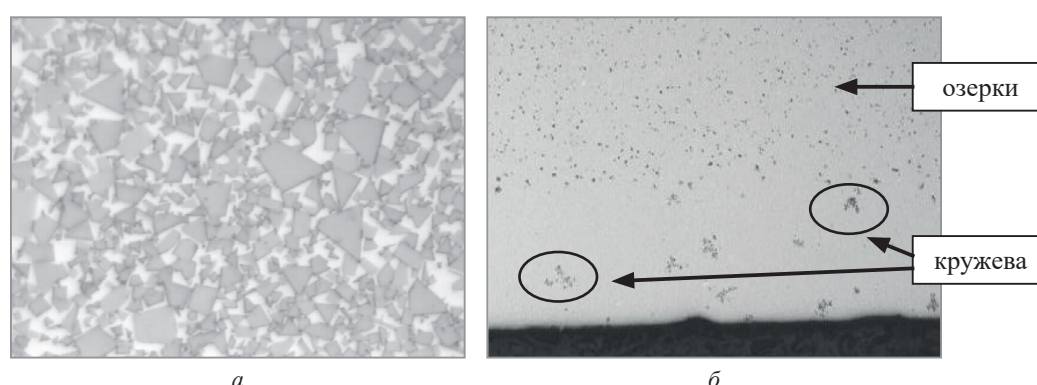


Рис. 5. Микроструктура твердосплавного образца после травления в реактиве Мураками, продольное сечение: *а* – зерна α -фазы. $\times 1500$; *б* – характер распределения η -фазы. $\times 100$

Проведенный анализ показывает важность металлографической подготовки твердосплавных образцов для правильной оценки характеристик твердого сплава. Выявленные дефекты твердого сплава при металлографическом анализе твердосплавных образцов позволяют корректировать технологический процесс изготовления волок-заготовок и не допускать простоя оборудования из-за некачественного волочильного инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Практическая металлография / Р. И. Малинина, Е. С. Малютин, В. Ю. Новиков [и др.]. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 240 с.
2. **Фомина, О. Н.** Порошковая металлургия: энциклопедия международных стандартов / О. Н. Фомина, С. Н. Суворова, Я. М. Турецкий. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. – 312 с.

REFERENCES

1. **Malinina R.I.** *Prakticheskaja metallografija* [Practical metallography]. Moscow, Intermet Inzhiniring Publ., 2002, 240 p.
2. **Fomina O.N., Suvorova S.N., Tureckij Ja.M.** *Poroshkovaja metallurgija: Jenciklopedija mezhdunarodnyh standartov* [Powder Metallurgy: Encyclopedia of International Standards]. Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov Publ., 1999, 312 p.



УДК 669.017:620.1+ 669.1.017:543

ОСНОВНЫЕ ДЕФЕКТЫ СТРУКТУРЫ И СОСТОЯНИЕ ТРУБ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ Г. МИНСКА ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*А. Г. АНИСОВИЧ, М. Л. ХЕЙФЕЦ, А. С. ГАРКУН, ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 16. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru
В. Е. ШОЛОНИК, С. Ф. ГОРИЧЕНКО, УП «Мингаз» Минэнерго РБ,
г. Минск, Беларусь, ул. Ботаническая, 11/1
А. О. ШАБЛОВ, ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 16*

В статье рассматриваются характерные макро- и микроструктурные дефекты труб газового хозяйства г. Минска, изменение механических свойств, а также ресурс работы труб после длительной (50 лет и более) эксплуатации. Поскольку эксплуатация газопроводов в условиях Республики Беларусь происходит в условиях незначительных перепадов температур, не наблюдается существенных изменений структуры, влияющих на целостность объектов и увеличение аварийной опасности системы. Показано, что обнаруженные дефекты труб газового хозяйства можно разделить по их происхождению: дефекты, внесенные на стадии изготовления труб; дефекты, возникшие в процессе эксплуатации. Основными дефектами, внесенными на этапе изготовления труб, являются неметаллические включения и шлаки, а также посторонние материалы; дефекты, регламентированные ГОСТ 5640-2020 – полосчатость, видманштеттова структура, структурно-свободный цементит. Основным дефектом, возникающим в процессе эксплуатации, является нарушение защитного покрытия, что приводит к дефектам коррозионного происхождения вплоть до нарушения сплошности труб. Регрессионный анализ, проведенный для массива данных по трубам из углеродистых сталей, не выявил тенденций к изменению прочности, пластичности, твердости. Снижение ударной вязкости может быть связано с наличием третичного цементита в структуре, что обусловлено процессом производства труб.

Ключевые слова. Трубная сталь, макроструктура, микроструктура, механические свойства, регрессионный анализ.

MAIN STRUCTURAL DEFECTS AND CONDITION OF PIPES OF THE GAS DISTRIBUTION SYSTEM OF MINSK AFTER LONG-TERM OPERATION

*A. G. ANISOVICH, M. L. KHEIFETS, A. S. GARKUN,
Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, 16, Akademicheskaya str. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru
V. E. SHOLONIK, S. F. GORICHENKO, UP “Mingaz” of the Ministry of Energy of the Republic of Belarus,
Minsk, Belarus, 11/1, Botanicheskaya str.
A. O. SHABLOV, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus”,
Minsk, Belarus, 16, Akademicheskaya str.*

The article considers typical macro- and microstructural defects of Minsk gas pipes, changes in mechanical properties, and the service life of pipes after long-term (50 years or more) operation. Since gas pipelines are operated in the Republic of Belarus under conditions of minor temperature fluctuations, there are no significant structural changes that affect the integrity of objects and increase the emergency hazard of the system. It is shown that the detected defects of gas pipes can be divided by their origin: defects introduced at the stage of pipe manufacturing; defects that arise during operation. The main defects introduced at the stage of pipe manufacturing are non-metallic inclusions and slags, as well as foreign materials; defects regulated by GOST 5640–2020 – banding, Widmanstätten structure, structurally free cementite. The main defect that occurs during operation is a violation of the protective coating, which leads to defects of corrosion origin up to a violation of the continuity of the pipes. Regression analysis conducted for the data set of carbon steel pipes did not reveal any trends in strength, ductility, or hardness. The decrease in impact toughness may be due to the presence of tertiary cementite in the structure, which is due to the pipe manufacturing process.

Keywords. Pipe steel, macrostructure, microstructure, mechanical properties, regression analysis.

Введение

Изменению состояния труб в газовой и нефтяной отраслях уделяется повышенное внимание как в связи с экономической важностью таких объектов, так и с тем, что они являются объектами повышенной опасности. При эксплуатации таких объектов в регионах с различными климатическими условиями выявляются как сходные, так и сугубо специфические проблемы. В [1] рассматривается деградация металла труб в условиях климата Республики Саха. Отмечаются две противоположные точки зрения на процесс деградации структуры и свойств: первая – не наблюдается существенных изменений структуры и свойств; вторая – происходят процессы деформационного старения под действием переменных температур от -40 до $+50$ °С, перераспределение азота и углерода, распад цементита, образование микротрещин. Для эксплуатации газопроводов в условиях Республики Беларусь не характерны большие перепады температур даже в зимнее время, поскольку речь идет о подземных коммуникациях. Были проведены исследования состояния труб газового хозяйства в пределах г. Минска [2]. Не отмечено существенных изменений микроструктуры, которые повлияли бы на целостность объектов и увеличение аварийной опасности системы. Тем не менее, по соображениям безопасности объектов газотранспортной системы, следует накапливать материал по возможному изменению состояния труб под воздействием временного фактора.

В данной статье представлено обобщение результатов работ по изучению состояния труб газового хозяйства г. Минска после длительной эксплуатации.

Материалы и методики эксперимента

Микроструктурные исследования выполнены на металлографическом комплексе на основе инвертированного микроскопа МИ-1, оснащенного программой обработки изображений AXALIT (разработчик Аксалит Софт) для фотографирования и количественной обработки данных. Использован анализ в светлом поле. Шлифы изготавливали по общепринятой методике. Травление образцов стали на микроструктуру произведено ниталем. Испытания на растяжения проводили на разрывной машине TESTOCO-100 при нагрузке до 45 кН. Ударную вязкость исследовали на маятниковом копре GALDABINI IMPACT 300.3.

Результаты и их обсуждение

Повреждения труб выявляли на макро- и микроскопическом масштабных уровнях. Основными макроструктурными дефектами являются механические повреждения поверхности – вмятины, забоины и др. (рис. 1), трещины и сквозные дефекты (рис. 2, 3), а также коррозионные поражения (рис. 3, 4).

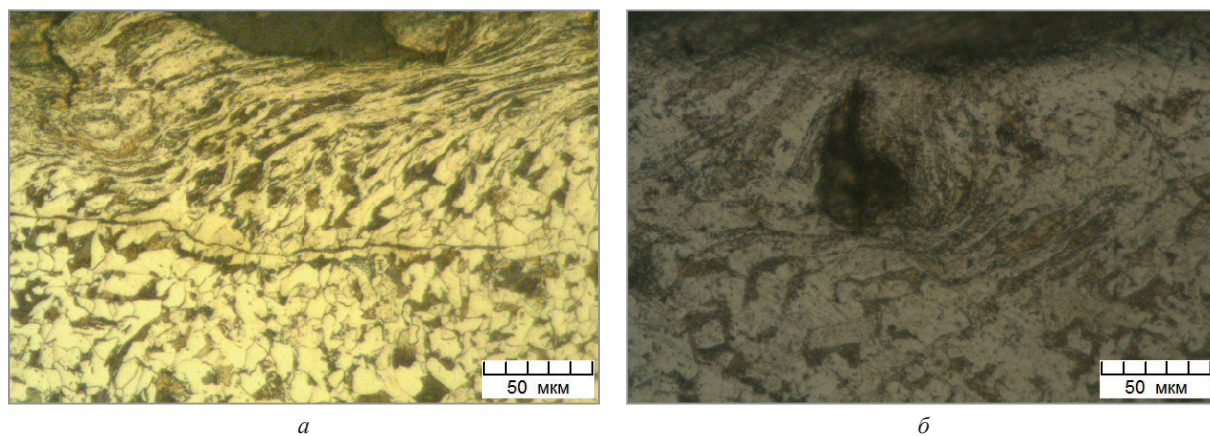


Рис. 1. Деформированные участки около поверхности трубы:
а – деформированная структура на поверхности; б – деформированный участок вокруг включения

Несплошности вследствие развития трещин и коррозионного процесса связаны, как правило, с нарушением гидроизоляции. Для гидроизоляции труб использовали поливинилхлоридную и термоусаживаемую ленты и муфты, жидкую резину, пенополиуретан, различные полимерные составы, обмазочную гидроизоляцию битумной мастикой, что надежно предохраняет от коррозии. Нарушение гидроизоляции может иметь место вследствие механических повреждений при проведении строительно-монтажных либо ремонтных работ.

Наиболее вероятными могут быть следующие механизмы образования сквозного повреждения: повреждение участка трубы с образованием прогиба и локальной вмятины с задирам, а также возможным



Рис. 2. Сквозное повреждение трубы: *а* – наружная поверхность стенки трубы, *б* – поперечное сечение повреждения в зоне трещины на всю толщину стенки трубы, утяжина



Рис. 3. Участок трубы со сквозным коррозионным повреждением после удаления неметаллических отложений: *а* – наружная сторона, *б* – поверхность излома в зоне окисления

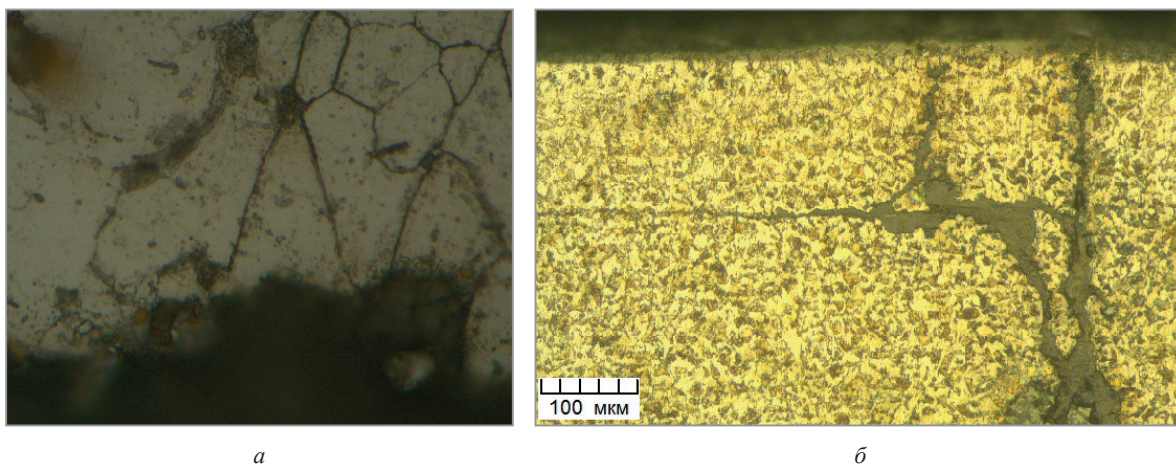


Рис. 4. Развитие коррозионного процесса: *а* – межкристаллитная коррозия; *б* – коррозия по сульфидным включениям

локальным повреждением изоляционного покрытия; рост напряжений в зоне наклепанного металла в процессе длительной эксплуатации под действием растягивающих напряжений, ориентированных в продольном направлении. Растягивающие напряжения образуются в результате дополнительного давления грунта на трубу с прогибом, наклепанный металл – в результате задира на локальной вмятине;

образование трещин незначительной протяженности, направленной перпендикулярно действию растягивающих напряжений; рост трещин по механизму коррозионного растрескивания под напряжением.

На рис. 2 показано распространение трещин на всю глубину толщины стенки трубы на протяжении не более 20 мм. В поперечном сечении в зоне трещины фиксировали утяжины с внутренней стороны стенки трубы (см. рис. 2, б). В поперечном сечении стенки трубы в зоне повреждения, кроме основной трещины, формируются множественные трещины глубиной до 30 % толщины стенки трубы с наружной поверхности (см. рис. 3, б). Трещины ветвистые, хаотично распространяются в глубь стенки трубы.

Предварительная деформация может влиять на окисление стали при температурах, не превышающих температуру возврата или рекристаллизации. Установлено, что предварительная деформация металла несколько ускоряет его окисление в начальной стадии вследствие повышения энергии металла и влияния на структуру образующейся первичной оксидной пленки, а растягивающие напряжения увеличивают возможность протекания местной, в частности, межкристаллитной коррозии [3].

Основными микроструктурными дефектами являются включения шлаков (рис. 5, а) и посторонних материалов (рис. 5, б), в том числе закатанные в металл при обработке поверхности; сульфидные включения, силикаты; полосчатость и видманштеттова структура (рис. 6, а); третичный цементит (рис. 6, б) зачастую в виде сетки, что встречается достаточно часто. Влияние структурно-свободного цементита на свойства труб для газового хозяйства показано в [4]. Микроструктурные дефекты не связаны, как правило, с эксплуатацией труб, а обусловлены процессом их изготовления. Такие дефекты, как приведенные на рис. 6, зачастую соответствуют максимальным баллам по шкалам микроструктур по ГОСТ 5640-2020. В частности, балл структурно-свободного цементита на рис. 6, б соответствует 6. Все перечисленные дефекты микроструктуры обусловлены производственным браком.

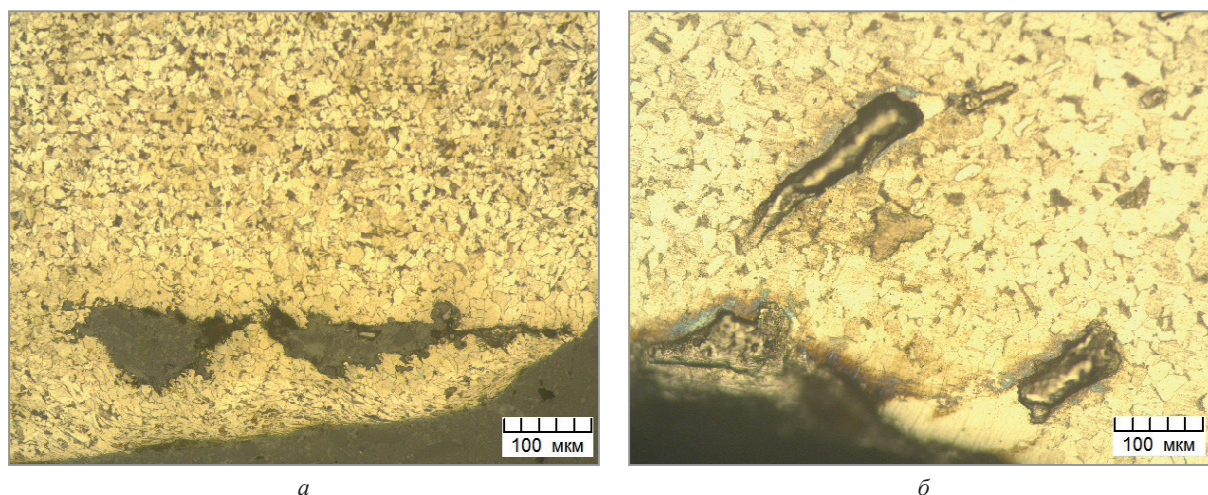


Рис. 5. Посторонние включения в структуре трубной стали: а – шлаки; б – металлические частицы

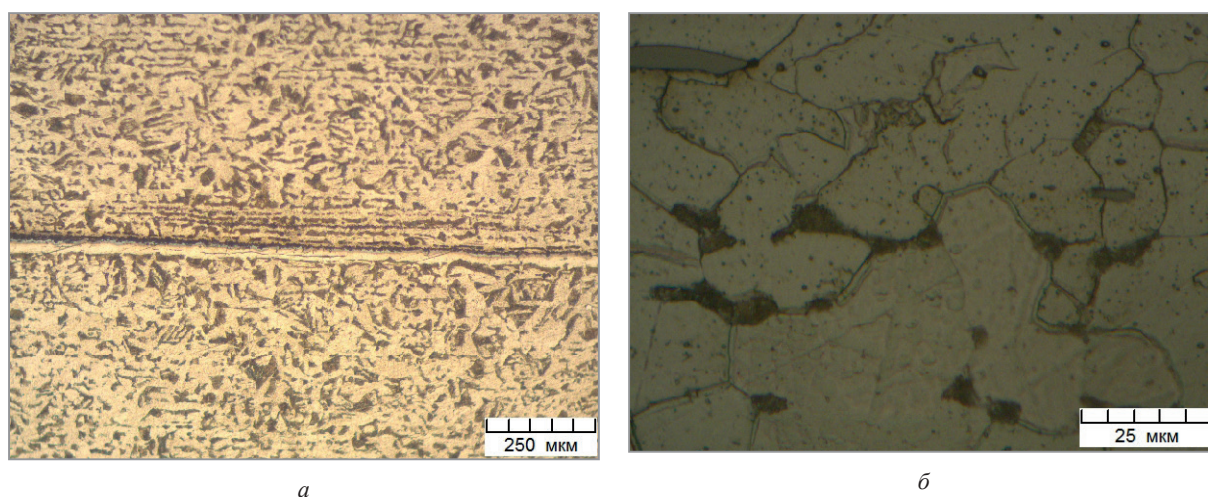


Рис. 6. Дефекты микроструктуры трубной стали, регламентированные ГОСТ 5640-2020: а – полосчатость и видманштеттова структура; б – структурно-свободный цементит

На рис. 7 представлены результаты регрессионного анализа изменения свойств труб из углеродистых сталей различных марок в зависимости от срока их эксплуатации. Данные свидетельствуют об отсутствии выраженной зависимости предела текучести, предела прочности и относительного удлинения от срока использования труб.

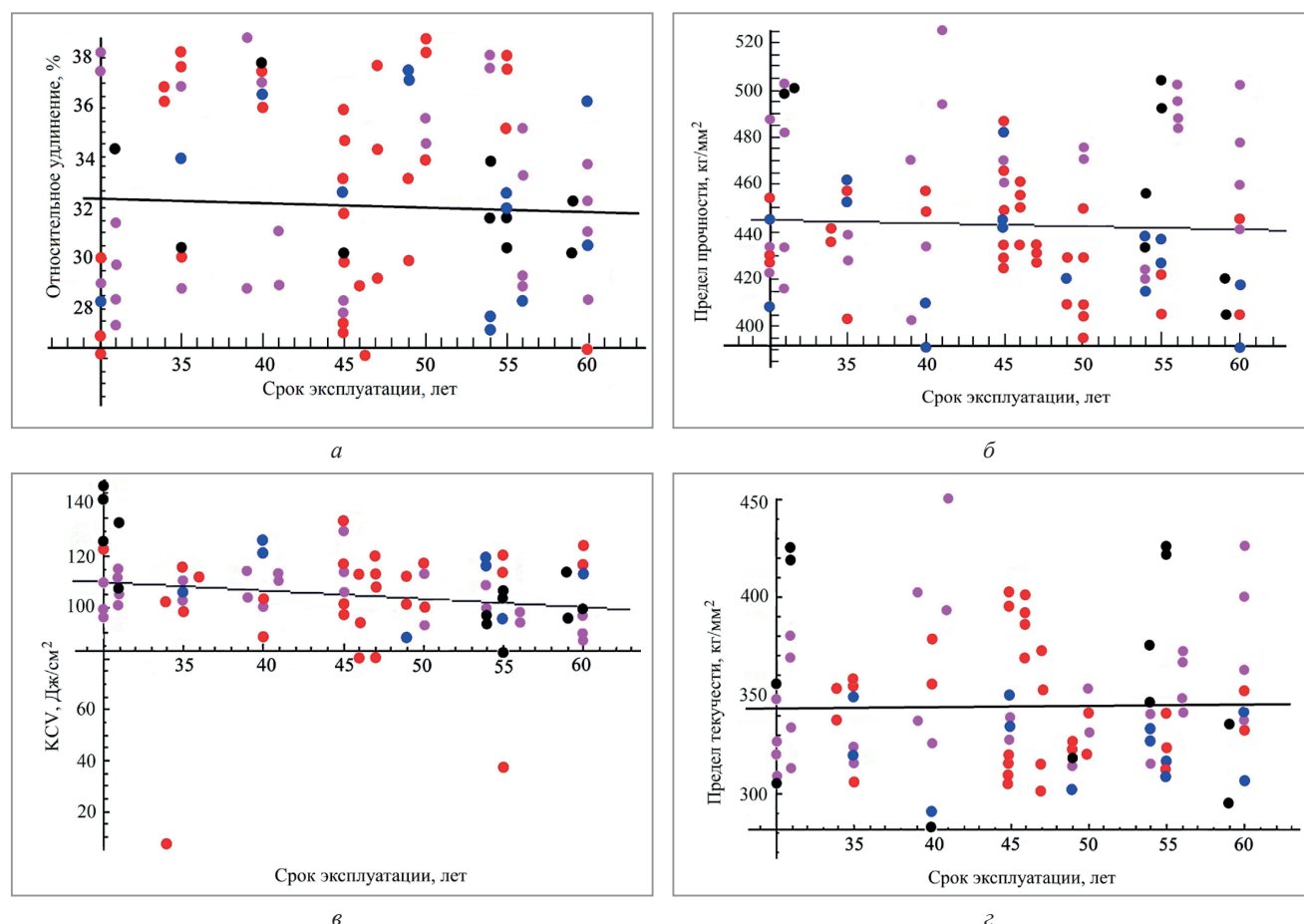


Рис. 7. Зависимость свойств металла труб от срока эксплуатации; ●, ●, ●, ● – Ст3 сп, Сталь 10, Сталь 20, Сталь 20 пс соответственно; черная прямая построена на основе метода наименьших квадратов

В частности, для предела текучести коэффициент корреляции Пирсона в данном случае получился равным 0,016, что указывает на отсутствие зависимости предела текучести от временного фактора. Уравнение линейной регрессии представим в виде $Y=aT+b$, где T – время эксплуатации трубы; Y – измеренный предел текучести; a и b – параметры регрессии. По данным измерений получены следующие значения параметров (см. ниже).

Параметр	Ожидаемое значение	Стандартное отклонение
a	0,0616	0,404
b	341,5	18,7

Как видно из полученных данных, нулевое значение параметра a лежит в пределах одного стандартного отклонения от ожидаемого значения. Если принять в качестве простой гипотезы H_0 равенство нулю параметра a , то рассчитанная на основе t -распределения Стьюдента вероятность этого события составляет 0,88. Соответственно гипотеза о равенстве нулю параметра a принимается при уровне значимости 0,1. Таким образом, предел текучести не зависит от срока эксплуатации экспериментальных образцов.

Снижение ударной вязкости (рис. 7, в) не связано напрямую с эксплуатацией труб, поскольку в процессе работы газопроводов не реализуются условия распада феррита. Учитывая, что в период 1985–1993 гг. наблюдалось снижение качества трубной продукции в целом, можно полагать, что снижение ударной вязкости вызвано дефектами структуры – сеткой структурно-свободного цементита [4], который формируется [5] при нарушении регламента термической обработки.