

## Применение современных цифровых инструментов для прецизионного определения результатов микротвердости на исследуемой поверхности.

*Р.А. Мамадалиев, А.В. Медведев, Е.Г. Ишкина, В.И. Берг*

*Тюменский индустриальный университет*

**Аннотация:** Рассматривается применение результатов измерений твердости в 3D-модели более высокого уровня. Были применены разные режимы сварки, в качестве расходных материалов использовали электроды ЦТ-15, ОЗЛ-8 и ЦЛ-11. Испытуемый материал - горячекатаная труба, диаметром 159 мм из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т, толщиной 6 мм. Электрод сплавляли до половины его длины и снимали с электрододержателя, после остывания остатка электрода его применяли повторно. Для сканирующего измерения микротвёрдости с нагрузкой 100 г, шаг движения индентора по образцу сканирования был применен 0,5 мм. Применение современного программного обеспечения более высокого уровня смогло более точно изучить результаты испытания. По результатам испытаний на твердость, образцов, сваренных электродами ЦТ-15 при максимальном токе, твердость была свыше 450-550 НV независимо от того, какой был проход. В случае с электродом марки ОЗЛ-8, но только при низких токах, твердость превышает 450 НV, чего нельзя сказать об образцах, сваренных на высоких токах, чья твердость сварного соединения не превышает 450 НV. При сварке этими электродами возможно применение в определенных проходах, например, при наплавке корневого слоя шва. Применение электродов ЦТ-15 при полной проплавке показало, что твердость сохранилась независимо от режима сварки.

**Ключевые слова:** сталь 12Х18Н10Т, многопроходная сварка, сварка аустенитных сталей, труба, покрытые электроды, режимы сварки, механические свойства, макроструктура Exel, Autodesk Inventor, ЦТ-15, ОЗЛ-8, ЦЛ-11, сила тока.

Сварка коррозионно-устойчивых сталей аустенитного класса занимает особое место в технологических процессах по сооружению и эксплуатации объектов нефтегазового сектора промышленности. К используемым в отрасли материалам предъявляются повышенные требования в связи с коррозионной активностью продуктов переработки. На сегодняшний день, трубы из стали 12Х18Н10Т применяются для транспортировки агрессивных сред, что, в свою очередь, предъявляет особые требования и к стыкам трубопроводов [1-3]. В связи с распространением материала в промышленности, требование к сварному соединению также растет [4,5]. Так как при сборке и сварке, сварное соединение может подвергаться различным нагрузкам, этот вопрос рассматривается уже индивидуально с каждым швом [6]. Состав электрода влияет на многие показатели качества шва [7], а

возможность изменить формулу, которая была написана в прошлом веке, нецелесообразна, кроме того, развитие цифровых технологий, изготовление и сборка источников питания могут повлиять на качества шва [8-10]. Тип источника питания может оказать влияние на передачу энергии в металл шва [11]. Так как сталь 12х18н10т требует индивидуальных подходов, то сварной шов подвергается испытаниям, в частности, твердость сварного шва, время сборки конструкции и сварка отдельных элементов [12]. Определение твердости металла на сварном соединении является одним из важных показателей устойчивости к пластической деформации. Методы данного исследования распространены во многих областях науки [13]. Распределение твердости рассматривается на трубопроводе, где шов подвергается постоянному воздействию с внутренней стороны и с внешней, такому, как погодные условия. Твердость сварного соединения играет особую роль при эксплуатации трубной конструкции. Учитывая, что трубопровод - самая распространённая конструкция в мире [13], термическое влияние, а значит, и влияние режимов при наплавке валика, может изменить структуру металла шва и околошовной зоны, что приводит к изменению показателей твердости во всех зонах сварного соединения [14,15]. Авторы статьи исследуют дефектные образцы сварных соединений, это поможет прогнозировать разрушение конструкций при проектировании на более современном программном обеспечении [16,17]. В статье рассмотрены варианты режимов сварки и определения твердости сварного соединения. Цель работы - определить влияние режимов сварки на твердость сварного соединения, и применить результаты измерения твердости сварного соединения в качестве 3Д-модели более высокого уровня, что открывает более подробную информацию о состоянии металла шва и его зон. Это приведет к детальному рассмотрению каждого слоя и прохода, и данный метод можно применять

---

для полного анализа твердости по слоям во всех координатах исследуемой области.

Методика: В качестве материала использована горячекатаная труба диаметром 159 мм из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т, толщиной 6 мм. Подготовку кромок выполняли по ГОСТ 16037-80, соединение С17. Применили ручную дуговую сварку электродами марок ОЗЛ-8, ЦЛ-11 и ЦТ-15. Режимы таблица №1 подбирались по требованию, прописанному на пачках для хранения электродов.

Таблица № 1

Маркировка образцов и режимы сварки

Маркировка образца	Нумерация в схеме	Тип электрода	Сварочный ток, А	скорость сварки, м/ч	Тип слоя К – корневой, З – заполняющий, О - облицовочный
1.1.1	6	Электрод ЦЛ-11	Сварочный ток – 70А	1,8	К
1.1.2	4			1,8	К+З
1.1.3	2			1,8	К+З+О
1.2.1	5	Электрод ЦЛ-11	Сварочный ток – 90А	2,88	К
1.2.2	3			2,88	К+З
1.2.3	1			2,88	К+З+О
2.3.1	6	Электрод ЦТ-15	Сварочный ток – 80А	1,8	К
2.3.2	4			1,8	К+З
2.3.3	2			1,8	К+З+О
2.4.1	5	Электрод ЦТ-15	Сварочный ток – 100А	2,88	К
2.4.2	3			2,88	К+З
2.4.3	1			2,88	К+З+О
3.5.1	6	Электрод ОЗЛ-8	Сварочный ток – 50А	1,8	К
3.5.2	4			1,8	К+З
3.5.3	2			1,8	К+З+О
3.6.1	5	Электрод ОЗЛ-8	Сварочный ток – 70А	2,88	К
3.6.2	3			2,88	К+З
3.6.3	1			2,88	К+З+О

Для сварки соединения использовали сварочный инвертор LORCH HandyTIG 180 AC/DC ControlPro. Периметр разбивался на шесть участков, вторая половина которых сваривалась по той же технологии, как и первая половина, но с другим режимом сварки. Сварку всех соединений выполнили на постоянном токе обратной полярности, схема показана на рис. 1. Обрезка и подготовка образцов проводилась на DeltaAbrasiMet и Automet 250 (Buehler). Для измерений микротвёрдости образцов, был использован микротвердомер Shimadzu HNV-2. Все аббревиатуры, сокращения и условные величины расшифровываются в тексте. Например: Южный федеральный университет (далее ЮФУ). Названия иностранных фирм и организаций даются в оригинальном написании с указанием страны. Например: Nanotech Industries, INC (USA, California).

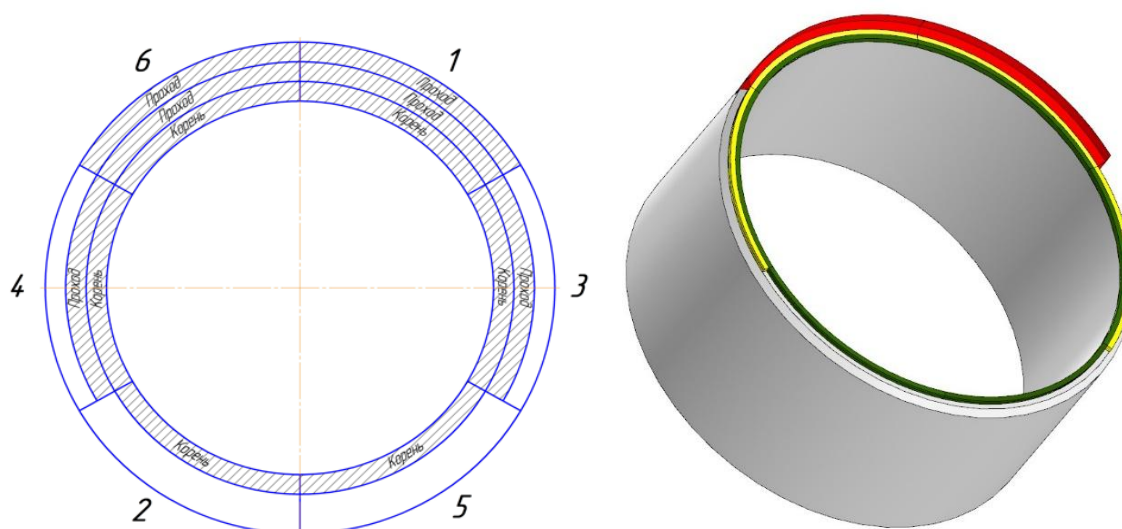


Рис. 1. Схема порядка сварки участков трубы

Работу по формированию сварного шва электродами вели следующим образом: электрод сплавляли до половины его длины и снимали его с электрододержателя, после остывания остатка электрода, его применяли повторно. Такая методика дает возможность не перегревать стержень и покрытие, что часто происходит из-за низкой теплопроводности металла стержня [18]. Испытание микротвёрдости по сечению сварного соединения

производилось на отполированных и протравленных шлифах, методом вдавливания алмазной пирамиды с углом между противоположными гранями  $136^\circ$ . Для сканирующего измерения микротвёрдости образцов с нагрузкой 100 г, шаг сканирования был применен - 0,5 мм. Общее усилие индентора - 98,07 Н. Время выдержки под нагрузкой - 10 сек. На рис. 2 представлены результаты измерения твердости сварного соединения. Так как сварное соединение имеет равность с двух сторон, то замеры снимали в половине сварного соединения. После измерения твердости на микротвердомере, результаты заносились в программу Excel, в каждую ячейку в соответствии с положением индентора на сварном соединении.

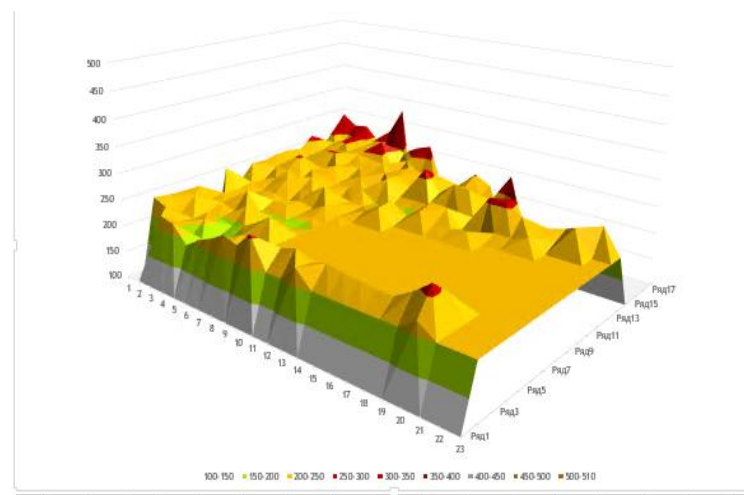


Рис. 2. Распределение результатов замера в Excel.

Для создания диаграмм рис. 3, основанных на данных из базы Excel, в программном комплексе Autodesk Inventor выполнялось построение плоскостей с заданным шагом, относительно базовой плоскости. Шаг в данном случае определялся путем подбора, чтобы достичь наиболее «сглаженного» и корректного варианта. Оптимальный шаг построения плоскостей - 100 мм. Затем, на каждой плоскости создавался 3D-эскиз и выстраивались точки: максимальные, минимальные и промежуточные. Точки необходимы для того, чтобы сохранять траекторию проецируемой криволинейной плоскости или для корректировок относительных координат.

В каждой промежуточной плоскости, после построения точек, необходимо было обвести их, для создания формообразующей кривой. С помощью инструмента «Построение плоскости по сети кривых» необходимо произвести выделение каждого эскиза в ранее построенных плоскостях, для образования криволинейной поверхности. Для разбивки получившегося массива, были выстроены вспомогательные прямые на соответствующих отметках (границах), в определенных границах объекты закрашиваются тем или иным цветом, в зависимости от цветового представления. Каждый образец создавался отдельно. Были выделены три цвета, которые информируют о твердости в сварном соединении.

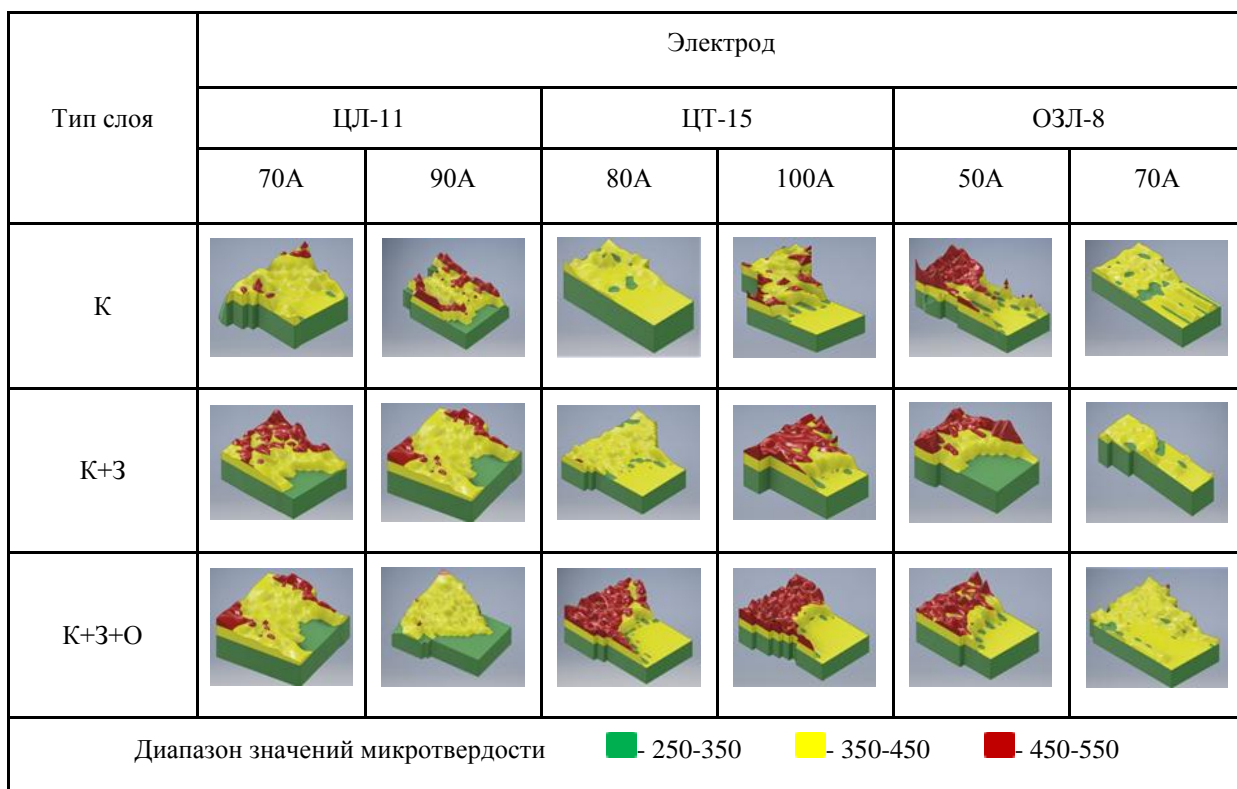


Рис. 3. Результаты измерения твердости.

По результатам образцов, сваренных ЦТ-15 при максимальном токе 100 А, мы можем утверждать, что твердость свыше 450-550 HV не зависит от того, какой был проход. Также и при сварке электродом марки ОЗЛ-8, но только при низких токах, твердость превышает 450 HV. В обоих электродах твердость повышена за счет режима и скорости сварки. При использовании

ОЗЛ-8, образцы, сваренные при высоких токах, имеют твердость меньше, чем при низких токах. При сварке этими электродами возможно применение в определенных проходах, например, при наплавке корневого слоя шва. Применение электродов ЦТ-15 при полной проплавке показало, что твердость сохранилась независимо от режима сварки.

### Литература

1. Доронина Т.А.; Сильнягина Н.С.; О.П. Максимкин; Л.Г. Турубарова Изменение микроструктуры и свойств облученной нейтронами аустенитной стали 12X18H10T в результате пост-радиационных отжигов // Вестник НЯЦ. 2008. №. 4. С. 99-105.
2. Закирничная М. М., Чиркова А. Т., Кузеев И. Р. Изменение структуры и свойств металла труб змеевиков печей пиролиза в процессе эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 1998. №. 2. С. 87-92.
3. Кузнецов М. А., Карцев Д. С. структурообразование сварных соединений из стали 12x18h10t // Metallurgy: технологии, управление, инновации, качество. 2014. С. 332-337.
4. Смирнов А.Н., Попова Н.А., Абабков Н.В., Никоненко Е.Л., Ожиганов Е.А., Конева Н.А. Влияние деформации на структуру и фазовый состав зоны термического влияния сварного шва стали 12X18H10T // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2019. Т. 16. №. 1. С. 9-15.
5. Попова Н.А., Смирнов А.Н., Никоненко Е.Л., Абабков Н.В., Конева Н.А. Влияние деформации на структурно-фазовое состояние зоны термического влияния в сварном шве стали 12X18H10T // Известия высших учебных заведений. Физика. 2019. Т. 62. №. 9. С. 48-56.
6. Трякина Н. Ю., Пояркова Е. В., Грызунов В. И. Анализ деградации структуры и механических свойств стали 12X18H10T в процессе длительной эксплуатации // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. №. 9. С. 11-15.

7. Ильященко Д. П. Влияние энергетических параметров инверторных источников питания на структуру и свойства неразъемных соединений при ручной дуговой сварке: диссертация кандидата технических наук: 05.02. 10 // Ильященко Дмитрий Павлович.

8. Смирнов И.В., Сидоров В.П., Хурин С.А., Смирнова А.И., Добровольский В.Г., Гилязов Э.С. Сравнение показателей энергоэффективности традиционного инверторного источника питания для дуговой сварки и инверторного источника питания для сварки с управляемым тепловложением // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2012. №. 8. С. 123-126.

9. Болотов С. В., Белягов А. М. Установка для испытаний источников питания дуговой сварки: дис. Белорусско-Российский университет, 2014.

10. Сидоров В.П., Смирнов И.В., Хурин С.А., Смирнова А.И. Оценка энергоэффективности инверторного источника питания для дуговой сварки с управляемым тепловложением // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2011. №. 11. С. 96-102.

11. Bakhmatov P.V., Mamadaliev R.A., Kravchenko A.S. (2021) Change in Weld Metal Structure and Properties for Multi-pass Butt Welding of Stainless Steel Process Piping. In: Shakirova O.G., Bashkov O.V., Khusainov A.A. (eds) Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 200. Springer, Cham. URL: [doi.org/10.1007/978-3-030-69421-0\\_53/](https://doi.org/10.1007/978-3-030-69421-0_53/)

12. Трякина Н. Ю., Пояркова Е. В., Грызунов В. И. Анализ деградации структуры и механических свойств стали 12X18H10T в процессе длительной эксплуатации // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. №. 9. – С. 11-15.

13. Липский В. К., Янушонок А. Н., Снарский А. С. Методика восстановительной термической обработки магистральных трубопроводов,

---



основанная на неразрушающей оценке фактического уровня механических свойств металла // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. 2006. С. 93-96.

14. Корнеев А. Е., Старченко Е. Г., Пронин В. П. Определение количества остаточного аустенита в сварных соединениях // Технология металлов. 2008. №. 5. С. 24-27.

15. Горшкова О.О. Сварка магистральных нефте- и газопроводов // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 2. С. 7-11; URL: [top-technologies.ru/ru/article/view?id=37906](http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37906)

16. Абашкин Е.Е., Жилин С.Г., Комаров О.Н., Предеин В.В. Структурные особенности и механические свойства соединения пластин из стали 45, полученного автоматической сваркой под слоем флюса порошковой проволокой с алюмотермитным наполнителем // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 11-1. С. 9-14. URL: [top-technologies.ru/ru/article/view?id=37757](http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37757)

17. Захаров М. Н., Насонов В. А. Экспериментальное моделирование поведения сварных соединений с дефектами несплошности при критических нагрузках // Известия вузов. Машиностроение. 2014. №2 (647). URL: [cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-modelirovanie-povedeniya-svarnyh-soedineniy-s-defektami-nesploshnosti-pri-kriticheskikh-nagruzkah](http://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-modelirovanie-povedeniya-svarnyh-soedineniy-s-defektami-nesploshnosti-pri-kriticheskikh-nagruzkah)

18. Мамадалиев Р. А., Бахматов П. В., Ильященко Д. П., Торопов С. Ю. Влияние режимов и скорости процесса сварки на содержание легирующих элементов в сварочном шве // Территория Нефтегаз. 2019. № 3. С. 74-78.

### References

1. Doronina T.A.; Sil'nyagina N.S; Maksimkin O.P., Turubarova L.G. Vestnik NYaTs. 2008. №. 4. pp. 99-105.

---

2. Zakirnichnaya M. M., Chirkova A. T., Kuzeev I. R. zvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz. 1998. №. 2. pp. 87-92.
3. Kuznetsov M. A., Kartsev D. S. Metallurgiya: tekhnologii, upravlenie, innovatsii, kachestvo. 2014. pp. 332-337.
4. Smirnov A.N., Popova N.A., Ababkov N.V., Nikonenko E.L. Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya. 2019. T. 16. №. 1. pp. 9-15.
5. Smirnov A.N., Popova N.A., Ababkov N.V., Nikonenko E.L., Koneva N.A. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika. 2019. T. 62. №. 9. pp. 48-56.
6. Tryakina N. Yu., Poyarkova E. V., Gryzunov V. I. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 2009. №. 9. pp. 11-15.
7. Il'yashchenko D. P. Vliyanie energeticheskikh parametrov invertornykh istochnikov pitaniya na strukturu i svoystva neraz'emnykh soedineniy pri ruchnoy dugovoy svarke [Influence of energy parameters of inverter power sources on the structure and properties of permanent joints in manual arc welding]: dissertatsiya kandidata Tekhnicheskikh nauk: 05.02. 10. Il'yashchenko Dmitriy Pavlovich.
8. Smirnov I.V., Sidorov V.P., Khurin S.A., Smirnova A.I., Dobrovolskiy V.G. Gilyazev E.S. Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya. 2012. №. 8. pp. 123-126.
9. Bolotov S. V., Belyagov A. M. Ustanovka dlya ispytaniy istochnikov pitaniya dugovoy svarki [Test rig for arc welding power supplies]: dis. Belorussko-Rossiyskiy universitet, 2014.
10. Sidorov V.P., Smirnov I.V., Khurin S.A., Smirnova A.I. Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya. 2011. №. 11. pp. 96-102.
11. Bakhmatov P.V., Mamadaliev R.A., Kravchenko A.S. (2021) Change in Weld Metal Structure and Properties for Multi-pass Butt Welding of Stainless Steel Process Piping. In: Shakirova O.G., Bashkov O.V., Khusainov A.A. (eds)

Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 200. Springer, Cham. URL: [doi.org/10.1007/978-3-030-69421-0\\_53/](https://doi.org/10.1007/978-3-030-69421-0_53/)

12. Tryakina N. Yu., Poyarkova E. V., Gryzunov V. I. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 2009. №. 9. pp. 11-15.

13. Lipskiy V. K., Yanushonok A. N., Snarskiy A. S. Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B, Promyshlennost'. Prikladnye nauki. 2006. Pp.93-96.

14. Korneev A. E., Starchenko E. G., Pronin V. P. Tekhnologiya metallov. 2008. №. 5. pp. 24-27.

15. Gorshkova O.O. Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2020. № 2. pp. 7-11. URL: [top-technologies.ru/ru/article/view?id=37906](http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37906)

16. Abashkin E.E., Zhilin S.G., Komarov O.N., Predein V.V. Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2019. № 11-1. pp. 9-14. URL:[top-technologies.ru/ru/article/view?id=37757](http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37757)

17. Zakharov M. N., Nasonov V. A. Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. 2014. №2 (647). URL:[cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-modelirovanie-povedeniya-svarnyh-soedineniy-s-defektami-nesploshnosti-pri-kriticheskikh-nagruzkah](http://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-modelirovanie-povedeniya-svarnyh-soedineniy-s-defektami-nesploshnosti-pri-kriticheskikh-nagruzkah)

18. Mamadaliev R. A., Bakhmatov P. V., Il'yashchenko D. P., Toropov S. Yu. Territoriya Neftegaz. 2019. № 3. pp. 74-78.