

**МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ
METALLURGY AND HEAT TREATMENT OF METALS AND ALLOYS**

Научная статья

УДК 621.785.616

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-58-69

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЙ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ НА СТРУКТУРУ,
МЕХАНИЧЕСКИЕ, АКУСТИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.
ЧАСТЬ 1. ОБЪЕМНАЯ ЗАКАЛКА И ОТПУСК**

**Абабков Николай Викторович¹, Пашков Алексей Анатольевич²,
Пимонов Максим Владимирович¹, Левашова Елена Евгеньевна¹,
Щепетков Алексей Владимирович¹, Сивушкин Александр Сергеевич¹**

¹Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

²ООО «Гидротехмаркет»

*для корреспонденции: ababkovnv@kuzstu.ru



Информация о статье

Поступила:

01 апреля 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

25 июля 2024 г.

Принята к публикации:

29 августа 2024 г.

Опубликована:

26 сентября 2024 г.

Ключевые слова:

объемная закалка, микроструктура, твердость, механические характеристики, неразрушающий контроль, спектрально-акустический метод, интенсивность магнитного шума

Аннотация.

Актуальность представленных исследований обусловлена необходимостью получения поверхностных слоев деталей с высокими показателями прочности и пластичности. Для этого необходимо подобрать соответствующий режим объемной закалки, которая позволит повысить прочность и применить рассматриваемый материал для изготовления деталей и изделий, способных выдерживать высокие нагрузки. В статье выполнены исследования влияния режима термической обработки высококачественной легированной стали 38Х2МЮА на структуру, механические, акустические и магнитные характеристики. В рамках первой части исследования рассмотрены различные варианты объемной закалки, отпуска и охлаждения. Установлены наиболее подходящие режимы термообработки, при которых обеспечивается оптимальное сочетание условного предела текучести, временного сопротивления, относительного удлинения, ударной вязкости и соотношения зернистого перлита к пластинчатому. Проведенная статистическая обработка результатов измерения механических характеристик позволила получить уравнения зависимости между условным пределом текучести, временным сопротивлением и твердостью, которые могут применяться для прогнозирования механических свойств готовых изделий после термообработки. По результатам металлографических исследований установлено, что структура исследуемой стали состоит из двух фаз – пластинчатого и зернистого перлита. Механические свойства перлита зависят в первую очередь от суммарной толщины пластинок обеих фаз: чем оно меньше, тем выше значения предела прочности и предела текучести и ниже температура хладноломкости, что соответствует рассмотренным режимам термообработки образцов. Неразрушающий контроль не показал однозначных результатов корреляции с механическими свойствами после термообработки, однако выявлена зависимость между ударной вязкостью и размахом амплитуды принятого сигнала поверхностной акустической волны. Таким образом, применение спектрально-акустического метода

неразрушающего контроля требует дальнейших исследований.

Для цитирования: Абабков Н.В., Пашков А.А., Пимонов М.В., Левашова Е.Е., Щепетков А.В., Сивушкин А.С. Влияние режима термической обработки высококачественной легированной стали на структуру, механические, акустические и магнитные характеристики. Часть 1. Объемная закалка и отпуск // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 4 (164). С. 58-69. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-58-69, EDN: WUWBYB

Введение

В процессе производства металлы подвержены многократной обработке. Так, одни операции предназначены для формирования нужных геометрических размеров и конфигурации, а другие для улучшения свойств [1]. Термическая обработка является одним из основных методов получения необходимой структуры и улучшения механических свойств деталей промышленного оборудования. Наиболее распространенными методами являются объемная и поверхностная закалка, лазерная обработка, электроискровое легирование и азотирование [2, 4].

Для того, чтобы получить поверхностный слой с высокими показателями прочности и пластичности, необходимо подобрать соответствующий режим объемной закалки, которая позволит повысить прочность и применить рассматриваемый материал для изготовления деталей и изделий, способных выдержать высокие нагрузки [5]. Закалка – это вид термической обработки, при котором осуществляется нагрев до критических температур с изменением типа кристаллической решетки. После нагрева производится резкое охлаждение в масле, при помощи твердого теплоносителя, в воде, на воздухе, с применением жидких полимеров или водяного тумана [6, 7].

Изменения, происходящие в кристаллической решетке при термической обработке, свойственны только полиморфным материалам, т.е. веществам с постоянным химическим составом, способным образовывать различные кристаллические структуры под влиянием внешних факторов.

При высоких температурах (обычно 800–900°C) металл становится более твердым из-за структурных превращений. Хрупкость его при этом увеличивается, а пластичность снижается. Для того, чтобы металл стал более прочным и пластичным, производят отпуск после закалки. При проведении отпуска сплав или чистый металл нагревается до температур от 150 до 650°C и после медленно остывает [8–12].

Закалка позволяет получить следующие результаты [13]:

- повысить твердость металла и, изделия, изготовленного из него;
- упрочнить поверхностный слой;
- повысить пластичность для увеличения сопротивления на изгиб.

Металл после закалки становится более твердым, прочным, износостойким и, следовательно, долговечным. Упрочнение позволяет снизить массу изделия. За счет достижения необходимых параметров глубина упрочненного поверхностного слоя изделия может быть уменьшена.

Структура сталей, состав и форма компонентов кристаллической решетки претерпевают некоторые изменения при нагреве. При температуре 723 °C металл еще находится в твердом состоянии, однако в нем уже начинается распад карбида железа – цементита, а также в гамма-железе начинает образовываться аустенит – равномерный углеродный твердый раствор. С точки зрения последующей закалки такое состояние можно считать исходным [14].

При медленном охлаждении стали происходит распад аустенита. Вследствие этого металл возвращается к своему прежнему состоянию. Однако в случае быстрого охлаждения превращения произойти не успевают, и кристаллическая решетка приобретает особую структуру. Такие фазовые состояния, как перлит, мартенсит, сорбит, и троостит играют важную роль при [15–19].

Сталь, содержащая мартенситную фазу, является наиболее твердой. Такие сплавы применяются для изготовления качественных режущих инструментов, а также деталей, подвергающихся воздействию значительной сил трения, таких как втулки, шестерни, валы и обоймы. Закаливание до фазы троостита позволяет достичь комбинации твердости и упругости, что должно быть присуще таким деталям, как пружины, рессоры, амортизаторы, а также некоторым разновидностям ударного инструмента [20, 21].

Таблица 1. Результаты статических и динамических испытаний, а также измерения твердости
 Table 1. Results of static and dynamic tests, as well as hardness measurements

№ обр.	$\bar{\sigma}_T$, МПа	$\bar{\sigma}_B$, МПа	$\bar{\delta}$, %	\overline{KCU} , Дж/см ²	Среднее значение твердости, НВ
1	800,5	942,5	6,7	96,9	241,8
2	763,6	911,0	7,6	100,0	284,4
3	728,0	877,0	7,4	97,5	276,8
4	1254,9	1604,7	1,5	12,2	445,2
5	841,3	973,8	7,85	23,9	286,8
6	1056,3	1267,7	4,5	10,3	360,6

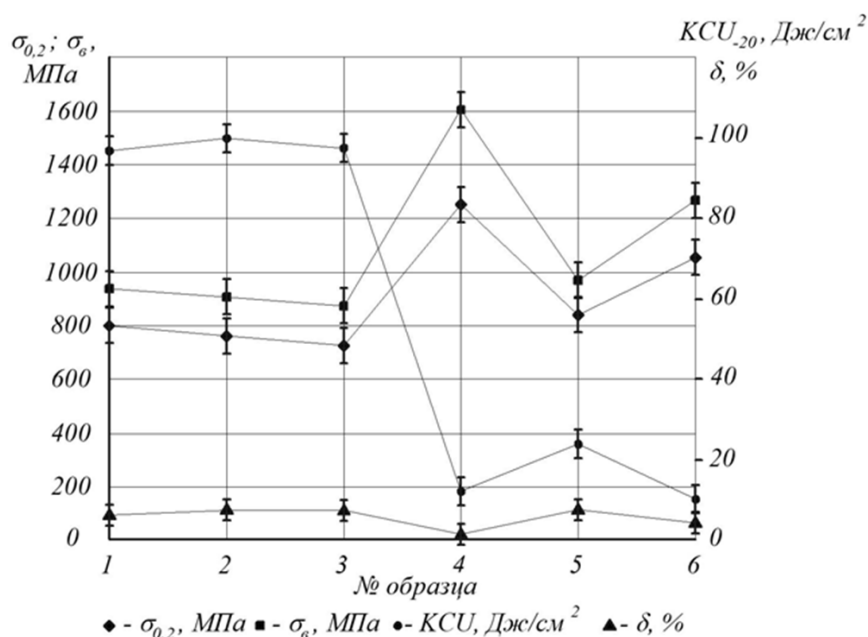


Рис. 1. Влияние режима термообработки на распределение значений механических характеристик
 Fig. 1. Influence of heat treatment mode on the distribution of mechanical characteristics values

Для того, чтобы придать стали износостойкость, оптимальную вязкость и упругость, ее подвергают закалке до фазы сорбита, что является необходимым при изготовлении элементов конструкций, эксплуатирующихся при непрерывных динамических или длительных нагрузках, например, рельсов. Перечисленные фазовые состояния характерны для всех углеродистых сталей, но для каждой конкретной марки характерны свои определенные режимы скорости охлаждения и значения температуры [21].

После закалки изменяются следующие свойства сталей [22–34]:

- твердость, которая увеличивается из-за микроструктуры сплава с образовавшимся мартенситом;

- износостойкость, а именно металл после закалки металл подвержен более медленному износу и способен выдержать активное трение. Износостойкость особенно важна для изделий с режущими кромками;

- прочность, которая также обусловлена сформировавшимся мартенситом, и связанная с этим повышенная стойкость к деформациям.

- хрупкость, которая после закалки может повыситься из-за того, что пластичность мартенситной структурной фазы ниже, чем в состоянии до термической обработки. Таким образом, прочность и твердость должны быть в балансе с оптимальной пластичностью для того, чтобы изделие не стало хрупким;

- ударная вязкость, которая соответствует способности поглощать возникающую при ударах механическую энергию. Стали, которые после термической обработки имеют высокие твердость и хрупкость, могут отличаться сниженной ударной вязкостью и склонностью к образованию трещин.

Рассмотренные свойства можно варьировать, корректно подобрав режим термообработки: температуру, вид и последовательность этапов обработки, а также скорость охлаждения. Так, например, твердость и хрупкость можно балансировать с помощью операции отпуска.

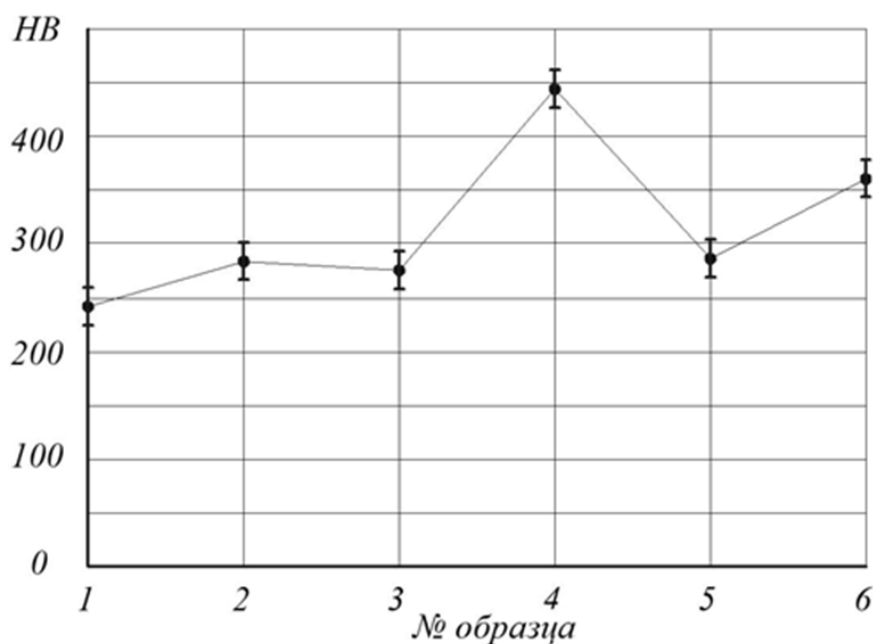


Рис. 2. Влияние режима термообработки на распределение значений твердости
 Fig. 2. Influence of heat treatment mode on the distribution of hardness values

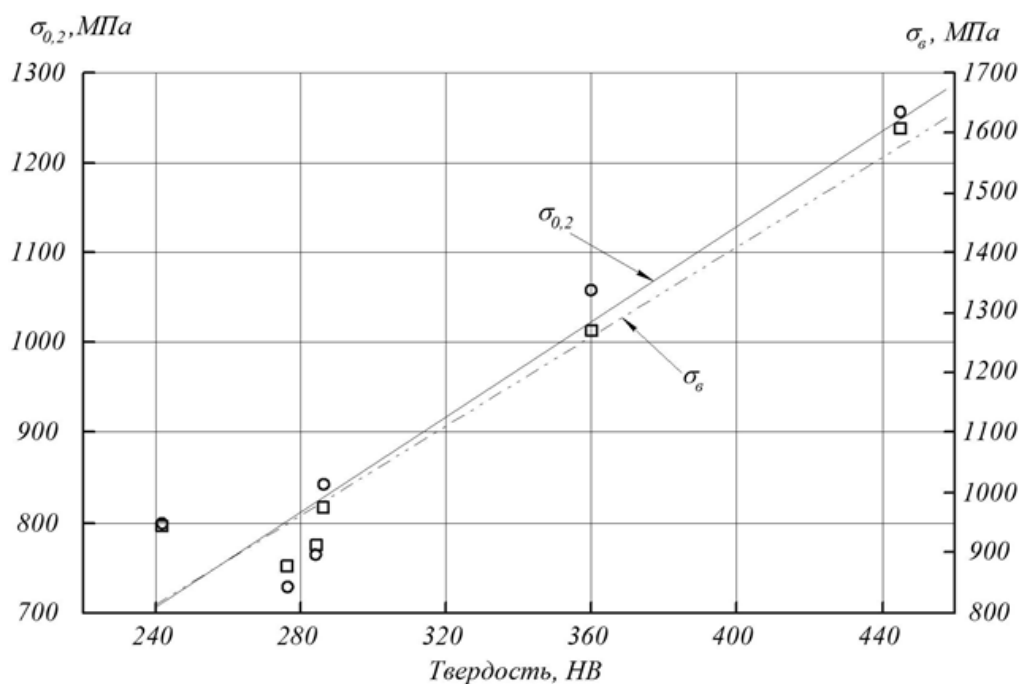


Рис. 3. Зависимости результатов измерения твердости от значений механических характеристик
 Fig. 3. Dependence of hardness measurement results on the values of mechanical characteristics

Таким образом, цель настоящей работы заключается в исследовании влияния режима закалки высококачественной легированной стали 38Х2МЮА на структуру, механические, акустические и магнитные характеристики.

Материалы и методики эксперимента

Исследования влияния режимов термической обработки стали 38Х2МЮА на механические свойства и структуру выполняли на следующих образцах:

- 1 – закалка при 940°C с охлаждением в воде, отпуск при 640°C с охлаждением водой;
- 2 – закалка при 940°C с охлаждением в воде, отпуск при 640°C с охлаждением на воздухе;
- 3 – закалка при 940°C с охлаждением в воде, отпуск при 640°C с охлаждением в печи;
- 4 – закалка 940°C с охлаждением в воде, отпуск при 200°C с охлаждением в печи.

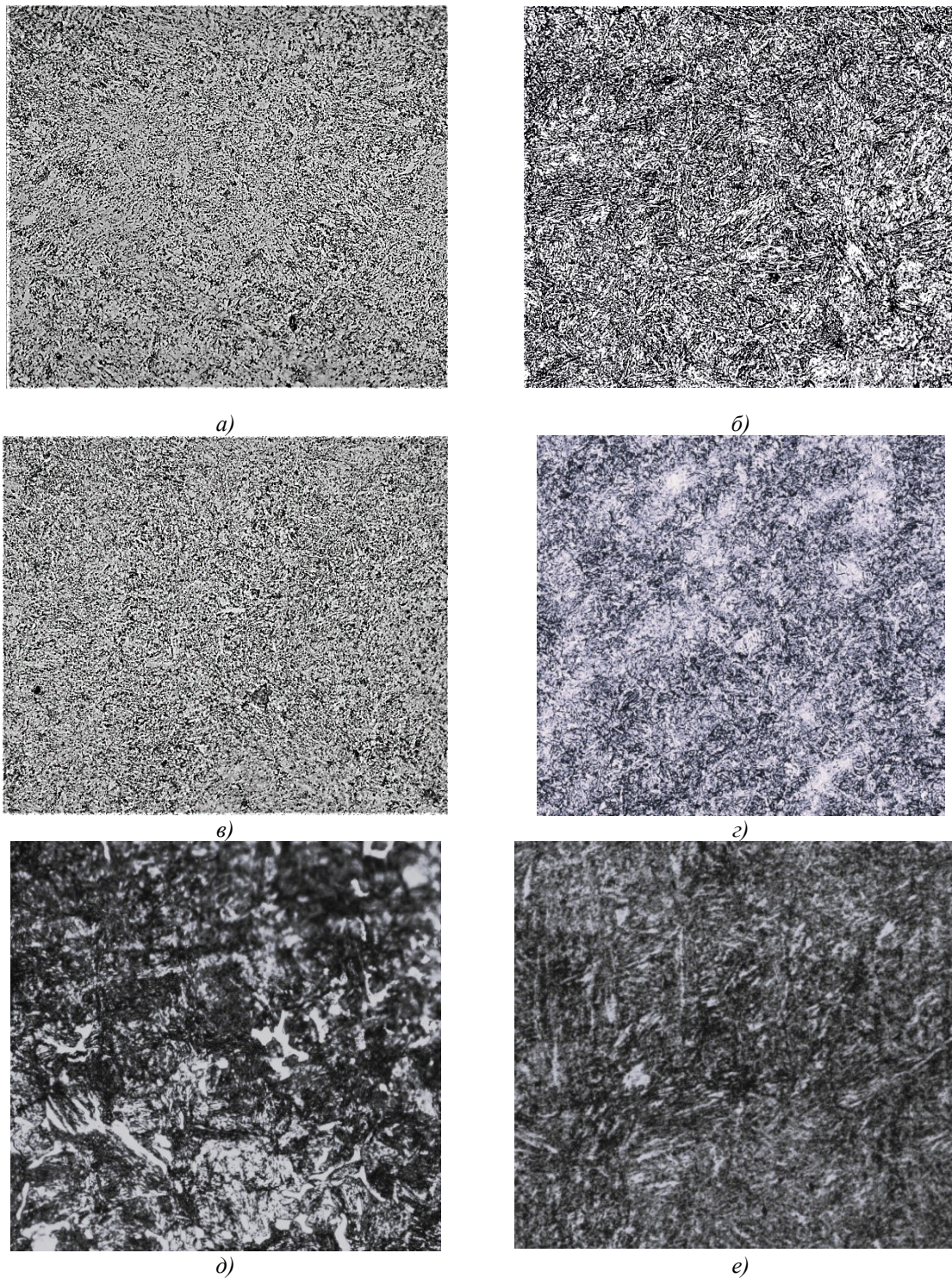


Рис. 4. Изображения структуры образцов стали 38X2МЮА после ТО, $\times 500$:
 а) режим №1, б) режим №2, в) режим №3, г) режим №4, д) режим №5, е) режим №6
 Fig. 4. Images of the structure of 0.38C-2Cr-1Mo-1Al steel samples after HT, $\times 500$:
 а) mode No. 1, б) mode No. 2, в) mode No. 3, г) mode No. 4, д) mode No. 5, е) mode No. 6

5 – закалка 940°C с охлаждением в воде, отпуск 560°C с охлаждением в печи.

6 – закалка 940°C с охлаждением в масле, отпуск 620°C с охлаждением в среде газа, в вакууме.

Контроль химического состава образцов выполняли методом спектрального анализа с применением оптического эмиссионного спектрометра «Q4 TASMАN».

Таблица 2. Результаты измерения акустических характеристик и интенсивности магнитного шума
 Table 2. Results of measuring acoustic characteristics and magnetic noise intensity

№ обр.	Направление контроля	R, нс	K _{зат} , 1/мкс	Амплитуда		MNI, б/в
				Верхняя	Нижняя	
1	вдоль	4660,5	-0,04	228,0	247,0	177,0
	поперек	4650,0	-0,06	255,5	270,5	386,0
2	вдоль	4647,0	-0,08	279,0	314,5	384,0
	поперек	4658,0	-0,12	321,0	353,0	359,7
3	вдоль	4630,5	-0,08	265,0	306,0	230,3
	поперек	4628,0	-0,11	305,5	340,5	194,0
4	вдоль	4679,0	-0,04	225,7	250,0	215,0
	поперек	4671,7	-0,05	242,0	246,7	251,7
5	вдоль	4652,7	-0,04	226,7	248,3	145,0
	поперек	4647,0	-0,05	227,0	252,0	257,3
6	вдоль	4704,3	-0,004	209,3	203,3	132,0
	поперек	4702,7	-0,07	269,3	274,0	117,7

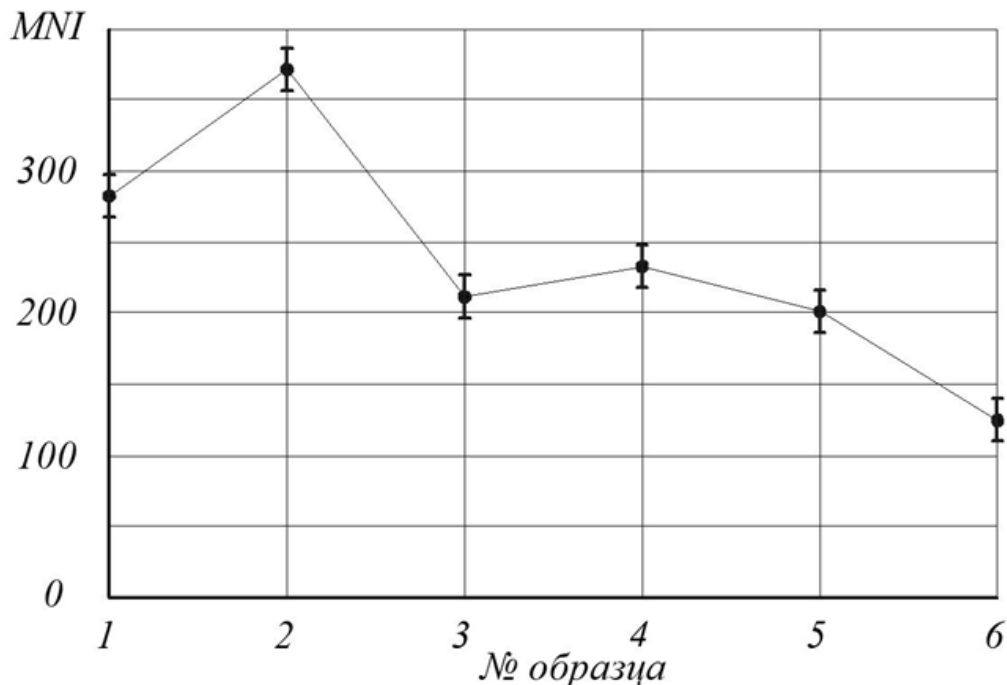


Рис. 5. Влияние режима термообработки на распределение значений интенсивности магнитного шума

Fig. 5. Influence of heat treatment mode on the distribution of magnetic noise intensity values

Для выявления зон с измененной структурой, а также степени ее изменения применяли спектрально-акустический анализ с автоматизированной акустической системой «АСТРОН» [35], измерения проводили на поперечном образце в 11 точках на расстоянии 9 мм. По аналогичной схеме применялся анализатор напряжений и структуры металлов магнитно-шумовой «Интроскан» [36].

Статические испытания проводили на разрывной машине УТС111.2-30,0-42, определяли условный предел текучести, временное сопротивление и относительное

удлинение образцов после термической обработки.

Для определения твердости использовали универсальный твердомер DuraVision-30.

Динамические характеристики (ударная вязкость) образцов определяли на маятниковом копре «IZOD-PENDEL». Испытания проводили на образцах с надрезом U при температуре -20°C.

Металлографические исследования выполнялись с последовательным шлифованием, полировкой и травлением образцов в 4%-ном растворе HNO₃ с этиловым спиртом. Изображения микроструктуры получали на

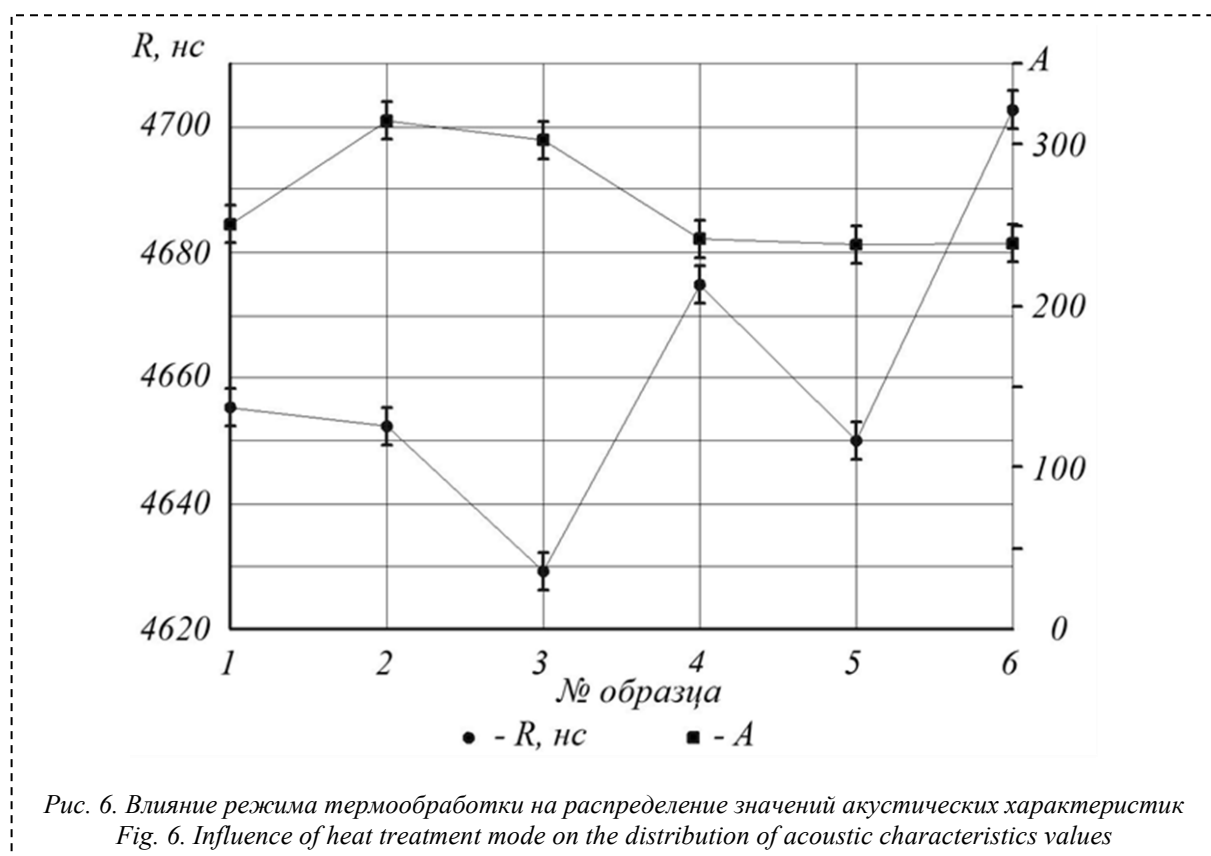


Рис. 6. Влияние режима термообработки на распределение значений акустических характеристик
Fig. 6. Influence of heat treatment mode on the distribution of acoustic characteristics values

микроскопе Axio Observer с увеличением $\times 500$ [36].

Результаты и их обсуждение

По результатам оценки механических свойств (Таблица 1) выявлено, что максимальное значение предела текучести и прочности (Рис. 1) так же, как и в случае с твердостью, наблюдается для режима термообработки №4 (Рис. 2).

Однако для данных образцов характерна минимальная ударная вязкость и относительное удлинение. Образцы 1–3, 5 показали близкие значения при статических испытаниях на прочность, но для режима термообработки 5 значения ударной вязкости практически в 5 раз ниже (Рис. 1). Максимальные значения твердости поверхностного слоя установлены для режима термообработки №4, для режимов термообработки 2, 3, 5 значения твердости близки (Рис. 2).

Несмотря на то, что данные закономерности являются известными, они дают большую погрешность при определении механических характеристик стали по твердости. Полученные уравнения (1, 2) позволят более точно определять механические свойства стали 38Х2МЮА в зависимости от режима термообработки по измеренной твердости:

$$\sigma_{0,2} = 71,33 + 2,65 \times HB \quad (r=0,96) \quad (1)$$

$$\sigma_B = -81,34 + 3,73 \times HB \quad (r=0,97) \quad (2)$$

По результатам металлографических исследований структура образцов (Рис. 5) соответствует смешанному перлиту и отличается размерами пластинок и соотношением

зернистого перлита к пластинчатому перлиту: у образца №1 согласно ГОСТ 8233 $\frac{35\%}{65\%}$, у образца №2 – $\frac{5\%}{95\%}$, у образца №3 – $\frac{20\%}{80\%}$, у образца №4 – $\frac{0\%}{100\%}$, у образца №5 – $\frac{65\%}{35\%}$, у образца №6 – $\frac{0\%}{100\%}$.

Статистическая обработка результатов определения механических свойств образцов показала устойчивую связь между условным пределом текучести, временным сопротивлением и твердостью (Рис. 3).

Как известно, механические свойства перлита зависят в первую очередь от суммарной толщины пластинок обеих фаз (пластинчатого и зернистого перлита): чем оно меньше, тем выше значения предела прочности и предела текучести и ниже температура хладноломкости, что соответствует режиму термообработки образцов №1–4 и №6.

Результаты испытаний неразрушающими методами контроля.

После статистической обработки значений характеристик, измеренных при неразрушающем контроле, установлено, что измерения вдоль и поперек оси образца не показали высокой степени значимости, поэтому для дальнейшего анализа значения усреднились.

Распределение показателей неразрушающего контроля не показало однозначных связей с режимами термообработки, однако при дальнейшей статистической обработке выявлена связь ударной вязкости образцов с амплитудой акустического сигнала (3):

$$KCU = -207,99 + 0,99 \times A \quad (r=0,79) \quad (3)$$

Несмотря на существующую погрешность, применение спектрально-акустического метода возможно для оперативного контроля параметров изделий после термообработки, однако применение данного метода требует дальнейшей проработки.

4. Выводы

1. Проведены исследования влияния режима термической обработки высококачественной легированной стали 38Х2МЮА на структуру, механические, акустические и магнитные характеристики. Установлены наиболее подходящие режимы термообработки, при которых обеспечивается оптимальное сочетание условного предела текучести, временного сопротивления, относительного удлинения, ударной вязкости и соотношения зернистого перлита к пластинчатому.

2. Статистическая обработка результатов определения механических свойств позволила получить уравнения зависимости между условным пределом текучести, временным сопротивлением и твердостью, которые могут применяться для прогнозирования механических свойств готовых изделий после термообработки.

3. По результатам металлографических исследований установлено, что структура исследуемой стали состоит из двух фаз – пластинчатого и зернистого перлита. Механические свойства перлита зависят в первую очередь от суммарной толщины пластинок обеих фаз: чем оно меньше, тем выше значения предела прочности и предела текучести и ниже температура хладноломкости, что соответствует рассмотренным режимам термообработки образцов №1–4 и №6.

4. Применение неразрушающего контроля не показало однозначных результатов корреляции с механическими свойствами после термообработки, однако выявлена зависимость между ударной вязкостью и размахом амплитуды принятого сигнала поверхностной акустической волны. Таким образом, применение спектрально-акустического метода неразрушающего контроля возможно и требует дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лахтин Ю. М. *Металловедение и термическая обработка металлов*. М. : Металлургия, 1983. –359 с.
2. Зуев В. М. *Термическая обработка металлов* : [Учеб. для сред. ПТУ]. 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Высш. шк. 1986. 287 с.
3. Chandler H., Li J. C. M., Warner S. *Heat treating of steel* // ASM International. 2011.
4. Smith R. W. *Heat Treatment Proceedings* // ASM International. 1993.
5. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П.

Материаловедение: учебник для высших технических учебных заведений. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1990. 528 с.

6. Гуляев, А.П. *Металловедение: учебник для вузов* / А.П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. доп. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

7. Totten G. E., Howes M. A., Inoue T. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel* // ASM International, 2002.

8. Новиков И. И. *Теория термической обработки металлов*. М. : Металлургия, 1986. 480 с.

9. Новиков И. И. *Металловедение, термообработка и рентгенография*. М. : МИСИС: Металлургия, 1994. 478 с.

10. Лисицкая Л. А. *Секреты сверхмелкого зерна стали*. М. : МОИМПЕКС, 1997. 142 с.

11. Pye D. *Heat Treatment: Principles And Techniques*, Materials Park // ASM International. 1994.

12. Totten G. E. *Steel Heat Treatment Handbook: Metallurgy and Technologies* // CRC Press. 2006.

13. Блантер М. Е. *Теория термической обработки*. М. : Металлургия, 1984. 328 с.

14. Федюкин В. К., Смагоринский М. Е. *Термоциклическая обработка металлов и деталей машин*. Л. : Машиностроение, 1989. 255 с.

15. Козловский А. Э., Колобов М. Ю. *Термическая обработка углеродистых сталей: учебное пособие*. Иваново : Иван. гос. хим.-технол. ун-т. 2017. 144 с.

16. Zhang Y., Ge Q., Wang Y. *Influence of Quenching Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Boron Steel* // *Materials Today: Proceedings*. 2020. №25. Pp. 86–92.

17. Li J., Liu X., Yang L. *Effect of Austenitizing Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Low Alloy Boron Steel* // *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021. №30(5). Pp. 3424–3430.

18. Wang J., Li H., Zhang M. *Improving the Quenching Performance of Boron Steel using Spray Quenching* // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. №106(3-4). Pp. 1193–1203.

19. Gong, W., Chen, X., & Dong, Y. *Investigation of Thermal Properties and Microstructure Evolution of Boron Steel during Heat Treatment Process* // *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. №66. Pp. 397–404.

20. Totten G. E. *Steel Heat Treatment Handbook* // CRC Press. 2006.

21. Бернштейн М. Л. *Термомеханическая обработка металлов и сплавов*. М. : Металлургия, 1983. 480 с.

22. Борисенок Г. В. [и др.] *Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справочник*. М. : Металлургия, 1981. 424 с.

23. Лахтин Ю. М., Арзамасов Б. Н. *Химико-термическая обработка металлов: учеб. пособие для вузов*. М. : Металлургия, 1985. 256 с.

24. Wang H., Si H., Liu M. *High Temperature Austenitizing Improves the Toughness and Ductility of*

Boron Steel // Materials Letters 2020. №277. Pp. 128318.

25. Rajan T. V., Sharma C. P., Sharma A. Principles of Heat Treatment of Steels // Prentice-Hall of India Pvt. Limited. 2010.

26. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учеб. пособие для вузов по направлению «Электроника, электротехника и электротехнологии» / под ред. Чередниченко В. С. 2-е изд., перераб. М. : Омега-Л, 2006. 751 с.

27. Лахтин Ю.М. Материаловедение: учеб. для вузов. 4-е изд., перераб. М. : Альянс, 2009. 528 с.

28. Короткова Л. П., Лацинина С. В., Рыжикова А. В. Выбор и термическая обработка конструкционных сталей для производства деталей гидроцилиндров крепей горно-шахтного оборудования // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. № 2. С. 47–49.

29. Коротков А. Н., Короткова Л. П., Баканов А. А. [и др.] Назначение режима термической обработки для деталей из конструкционной легированной стали, работающих в условиях динамических нагрузок // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 1(119). С. 154–165.

30. Глинка А. С., Смирнов А. Н., Козлов Э. В. [и др.] Влияние механико-термической обработки на структуру, поля внутренних напряжений и

акустические характеристики стали 35ХГС // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2012. № 2. С. 41–44.

31. Gupta T. S., Sahu S. K., Gupta R. K. Effect of Thermomechanical Processing on Hardening Mechanisms of Low Alloy Steel // Materials Today: Proceedings, 2020. №13(3). Pp. 150–157.

32. Zhang Z. M., Cao H. J., Gao L. J. Investigation of Microstructure and Hardening Behaviour of Ultrafine-Grained Steel Produced by Equal Channel Angular Pressing // Journal of Materials Science, 2020. №55. Is. 20. Pp. 8449–8463.

33. Rodrigues R.M., Nunes M.A. C. Effect of Heat Treatment on the Hardening Behavior of Medium Carbon Steel // Procedia Manufacturing, 2020. № 47. Pp. 1072–1077.

34. Lee J. Y., Kim H. S., Yoon J. K. Interfacial Hardening Behavior of Steel/Aluminum Dissimilar Material Friction Stir Welds // Materials Letters. 2020. № 263. Pp. 127258.

35. Левашова Е. Е., Пимонов М. В., Абабков Н. В. Расчет ресурса детали «ось» после восстановления // Горное оборудование и электромеханика. 2020. № 6(152). С. 3–9. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-6-3-9.

36. Ababkov N. V., Pimonov M. V., Levashova E. E. Structure, Magnetic Characteristics and Stress-Strain State of Structural Steel Welded Pipelines // Solid State Phenomena. 2022. №328 SSP. Pp. 73–82. DOI № 10.4028/p-6s6691.

© 2024 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Абабков Николай Викторович, заведующий кафедрой технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, к.т.н., доцент, e-mail: ababkovnv@kuzstu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0794-8040>

Пашков Алексей Анатольевич, заместитель директора ООО «ГидроТехМаркет», г. Междуреченск, а/я 142, e-mail: pashkov1983@mail.ru

Пимонов Максим Владимирович, доцент кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, к.т.н., e-mail: pimonovmv@kuzstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9509-4692>

Левашова Елена Евгеньевна, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, e-mail: petrova.lena-petrova2010@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4551-9187>

Щепетков Алексей Владимирович, аспирант кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, e-mail: shchetkov.97@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6716-6201>

Сивушкин Александр Сергеевич, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, e-mail: asashai_1@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Абабков Николай Викторович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, обзор соответствующей литературы, выводы, корректировка текста.

Пашков Алексей Анатольевич – предоставление образцов экспериментальных исследований.

Пимонов Максим Владимирович – научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, выполнение экспериментальных исследований – механические испытания, выводы, написание текста.
Левашова Елена Евгеньевна - выполнение экспериментальных исследований – металлографические испытания, выводы, написание текста.
Щепетков Алексей Владимирович - выполнение экспериментальных исследований – неразрушающие испытания, выводы, написание текста.
Сивушкин Александр Сергеевич – сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, построение графиков.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

INFLUENCE OF HARDENING MODE OF HIGH-QUALITY ALLOY STEEL ON STRUCTURE, MECHANICAL, ACOUSTIC AND MAGNETIC CHARACTERISTICS. PART 1. VOLUME HARDENING AND TEMPERING

Nikolay V. Ababkov¹, Alexey A. Pashkov², Maxim V. Pimonov¹,
Elena E. Levashova¹, Alexey V. Shchepetkov¹, Alexander S. Sivushkin¹

¹T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

²LLC «Gidrotekhmarket»

*for correspondence: ababkovnv@kuzstu.ru



Article info

Received:

01 April 2024

Accepted for publication:

25 July 2024

Accepted:

29 August 2024

Published:

26 September 2024

Keywords: volumetric hardening, microstructure, hardness, mechanical characteristics, non-destructive testing, spectral-acoustic method, magnetic noise intensity.

Abstract.

The relevance of the presented research is due to the need to obtain surface layers of parts with high strength and ductility. To do this, it is necessary to select the appropriate mode of volumetric hardening, which will increase the strength and use the material in question for the manufacture of parts and products that can withstand high loads. The article studies the influence of the heat treatment mode of high-quality alloy 0.38C-2Cr-1Mo-1Al steel on the structure, mechanical, acoustic and magnetic characteristics. The first part of the study examined various options for volumetric quenching, tempering and cooling. The most suitable heat treatment modes have been established, which provide the optimal combination of proof strength, tensile strength, elongation, impact strength and the ratio of granular to lamellar pearlite. The statistical processing of the results of measuring mechanical characteristics made it possible to obtain equations of the relationship between the conditional yield strength, tensile strength and hardness, which can be used to predict the mechanical properties of finished products after heat treatment. Based on the results of metallographic studies, it was established that the structure of the steel under study consists of two phases - lamellar and granular pearlite. The mechanical properties of pearlite depend primarily on the total thickness of the plates of both phases: the smaller it is, the higher the values of the tensile strength and yield strength and the lower the cold brittleness temperature, which corresponds to the considered heat treatment modes of the samples. Non-destructive testing did not show unambiguous results of correlation with mechanical properties after heat treatment, however, a relationship was revealed between impact strength and the amplitude range of the received surface acoustic wave signal. Thus, the application of the spectral-acoustic method of non-destructive testing requires further research.

For citation: Ababkov N.V., Pashkov A.A., Pimonov M.V., Levashova E.E., Shchepetkov A.V., Sivushkin A.S. Influence of hardening mode of high-quality alloy steel on structure, mechanical, acoustic and magnetic characteristics. Part 1. Volume hardening and tempering. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 4(164):58-69. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-58-69, EDN: WUWBYB

REFERENCES

1. Lakhtin Yu.M. Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. M.: Metallurgiya; 1983. 359 s.
2. Zuyev V.M. Termicheskaya obrabotka metallov : [Ucheb. dlya sred. PTU]. 3-ye izd., pererab. i dop. Moskva: Vyssh. shk.; 1986. 287 s.
3. Chandler H., Li J.C.M., Warner S. Heat treating of steel. *ASM International*. 2011.
4. Smith R.W. Heat Treatment Proceedings. *ASM International*. 1993.
5. Lakhtin Yu.M., Leont'yeva V.P. Materialovedeniye: uchebnik dlya vysshikh tekhnicheskikh uchebnykh zavedeniy. 3-ye izd., pererab. i dop. M.: Mashinostroyeniye; 1990. 528 s.
6. Gulyayev A.P. Metallovedeniye: uchebnik dlya vuzov. 6-ye izd., pererab. dop. M.: Metallurgiya; 1986. 544 s.
7. Totten G.E., Howes M.A., Inoue T. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. *ASM International*. 2002.
8. Novikov I.I. Teoriya termicheskoy obrabotki metallov. M.: Metallurgiya; 1986. 480 s.
9. Novikov I.I. Metallovedeniye, termoobrabotka i rentgenografiya. M.: MISIS: Metallurgiya; 1994. 478 s.
10. Lisitskaya L.A. Sekrety sverkhmelkogo zerna stali. M.: MOIMPEKS; 1997. 142 s.
11. Pye D. Heat Treatment: Principles And Techniques, Materials Park. *ASM International*. 1994.
12. Totten G.E. Steel Heat Treatment Handbook: Metallurgy and Technologies. *CRC Press*. 2006.
13. Blanter M.Ye. Teoriya termicheskoy obrabotki. M.: Metallurgiya; 1984. 328 s.
14. Fedyukin V.K., Smagorinskiy M.Ye. Termotsiklicheskaya obrabotka metallov i detaley mashin. L.: Mashinostroyeniye; 1989. 255 s.
15. Kozlovskiy A.E., Kolobov M.Yu. Termicheskaya obrabotka uglerodistykh staley: uchebnoye posobiye Ivanovo: Ivan. gos. khim.-tekhnl. un-t; 2017. 144 s.
16. Zhang Y., Ge Q., Wang Y. Influence of Quenching Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Boron Steel. *Materials Today: Proceedings*. 2020; 25:86–92.
17. Li J., Liu X., Yang L. Effect of Austenitizing Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Low Alloy Boron Steel // *Journal of Materials Engineering and Performance* 2021; 30(5):3424–3430.
18. Wang J., Li H., Zhang M. Improving the Quenching Performance of Boron Steel using Spray Quenching. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020; 106(3-4):1193–1203.
19. Gong W., Chen X., Dong Y. Investigation of Thermal Properties and Microstructure Evolution of Boron Steel during Heat Treatment Process. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021; 66:397–404.
20. Totten G.E. Steel Heat Treatment Handbook. *CRC Press*. 2006.
21. Bernshteyn M.L. Termomekhanicheskaya obrabotka metallov i splavov. M.: Metallurgiya; 1983. 480 s.
22. Borisenok G.V. [i dr.] Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov: spravochnik. M.: Metallurgiya; 1981. 424 s.
23. Lakhtin Yu.M., Arzamasov B.N. Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov: ucheb. posobiye dlya vuzov. M.: Metallurgiya; 1985. 256 s.
24. Wang H., Si H., Liu M. High Temperature Austenitizing Improves the Toughness and Ductility of Boron Steel. *Materials Letters*. 2020; 277:128318.
25. Rajan T.V., Sharma C.P., Sharma A. Principles of Heat Treatment of Steels. *Prentice-Hall of India Pvt. Limited*. 2010.
26. Materialovedeniye. Tekhnologiya konstruksionnykh materialov: ucheb. posobiye dlya vuzov po napravleniyu «Elektronika, elektrotehnika i elektrotekhnologii» / pod red. Cherednichenko V.S. 2-ye izd., pererab. M.: Omega-L; 2006. 751 s.
27. Lakhtin Yu.M. Materialovedeniye: ucheb. dlya vtuzov. 4-ye izd., pererab. M.: Al'yans; 2009. 528 s.
28. Korotkova L.P., Lashchinina S.V., Ryzhikova A.V. Vybor i termicheskaya obrabotka konstruksionnykh staley dlya proizvodstva detaley gidrotsilindrov krepey gorno-shakhtnogo oborudovaniya. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014; 2:47–49.
29. Korotkov A.N., Korotkova L.P., Bakanov A.A. [i dr.] Naznacheniyе rezhima termicheskoy obrabotki dlya detaley iz konstruksionnoy legirovannoy stali, rabotayushchikh v usloviyakh dinamicheskikh nagruzok. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017; 1(119):154–165.
30. Glinka A.S., Smirnov A.N., Kozlov E.V. [i dr.] Vliyaniye mekhaniko-termicheskoy obrabotki na strukturu, polya vnutrennikh napryazheniy i akusticheskoye kharakteristiki stali 35KHGS. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*. 2012; 2:41–44.
31. Gupta T.S., Sahu S.K., Gupta R.K. Effect of Thermomechanical Processing on Hardening Mechanisms of Low Alloy Steel. *Materials Today: Proceedings*. 2020; 13(3):150–157.
32. Zhang Z.M., Cao H.J., Gao L.J. Investigation of Microstructure and Hardening Behaviour of Ultrafine-Grained Steel Produced by Equal Channel Angular Pressing. *Journal of Materials Science*. 2020; 55(20):8449–8463.
33. Rodrigues R.M., Nunes M.A.C. Effect of Heat Treatment on the Hardening Behavior of Medium Carbon Steel. *Procedia Manufacturing*. 2020; 47:1072–1077.
34. Lee J.Y., Kim H.S., Yoon J.K. Interfacial Hardening Behavior of Steel/Aluminum Dissimilar Material Friction Stir Welds. *Materials Letters*. 2020; 263:127258.

35. Levashova Ye.Ye., Pimonov M.V., Ababkov N.V. Raschet resursa detali «os» posle vosstanovleniya. *Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika*. 2020; 6(152):3–9. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-6-3-9.

36. Ababkov N.V., Pimonov M.V., Levashova E.E. Structure, Magnetic Characteristics and Stress-Strain State of Structural Steel Welded Pipelines. *Solid State Phenomena*. 2022; 328 SSP:73–82. DOI: 10.4028/p-6s669l.

© 2024 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Nikolay V. Ababkov, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, st. Vesennyyaya, 28, Ph.D., Associate Professor, e-mail: ababkovnv@kuzstu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0794-8040>

Alexey A. Pashkov, Deputy Director of HydroTechMarket LLC, Mezhdurechensk, p.o. box 142, e-mail: pashkov1983@mail.ru

Maxim V. Pimonov, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, st. Vesennyyaya, 28, Ph.D., e-mail: pimonovmv@kuzstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9509-4692>

Elena E. Levashova, senior lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology, Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, st. Vesennyyaya, 28, e-mail: petrova.lena-petrova2010@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4551-9187>

Alexey V. Shchepetkov, graduate student of the Department of Mechanical Engineering Technology, Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, st. Vesennyyaya, 28, e-mail: shchepetkov.97@mail.ru

Alexander S. Sivushkin, senior lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology, Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, st. Vesennyyaya, 28, e-mail: asashai_1@mail.ru

Contribution of the authors:

Nikolay V. Ababkov – formulation of the research problem, conceptualization of the study, review of relevant literature, conclusions, text correction.

Alexey A. Pashkov – providing samples of experimental research.

Maxim V. Pimonov – scientific management, review of relevant literature, implementation of experimental studies – mechanical tests, conclusions, writing the text.

Elena E. Levashova – carrying out experimental research - metallographic tests, conclusions, writing the text.

Alexey V. Shchepetkov – performing experimental research - non-destructive testing, conclusions, writing the text.

Alexander S. Sivushkin – data collection and analysis, review of relevant literature, plotting.

All authors have read and approved the final manuscript.

