



Научная статья
2.6.17. – Материаловедение (технические науки)
УДК 669.15-194.3

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.030



ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ X12МФ

Сергей Геннадьевич Иванов ¹, Михаил Алексеевич Гурьев ²,
Алексей Михайлович Гурьев ³, Бурьял Дондокович Лыгденов ⁴

^{1,2,3} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

^{3,4} Уханьский текстильный университет, Ухань, КНР

⁴ Восточно-Сибирский университет технологий и управления, Улан-Удэ, Россия

¹ serg225582@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>

² gurievma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787>

³ gurievam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>

⁴ lygdenov59@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3580-6165>

Аннотация. В работе приведены результаты исследования хрупкого разрушения детали из стали X12МФ. Для этих сталей характерны следующие общие особенности. Неоднородность в распределении карбидов значительна; она усиливается с увеличением сечения проката (поковок) и содержания хрома и углерода; следовательно, механические свойства в крупных сечениях диаметром более 40–50 мм пониженные. Полученные результаты свидетельствуют о недогреве стали при нагреве под закалку и «недоотпуске» изделия (температура отпуска ниже 180 °С), либо по причине недостаточности времени выдержки при отпуске, либо (что наиболее вероятно) – по совокупности причин, заключающихся в понижении фактической температуры отпуска и недостаточного времени выдержки.

Ключевые слова: легированная сталь, закалка, отпуск, микроструктура, механические свойства.

Для цитирования: Влияние технологических параметров термической обработки на структуру и свойства ответственных деталей из стали X12МФ / С. Г. Иванов [и др.] // Ползуновский вестник. 2023. № 2. С. 230–237. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.030.EDN: <https://elibrary.ru/EBVHEG>.

Original article

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CRITICAL PARTS MADE OF STEEL X12MF

Sergey G. Ivanov ¹, Mikhail A. Guriev ², Alexey M. Guriev ³, Burial D. Lygdenov ⁴

^{1,2,3} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

^{3,4} Wuhan Textile University, Wuhan, China

⁴ East Siberian University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia

¹ serg225582@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>

² gurievma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787>

³ gurievam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>

⁴ lygdenov59@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3580-6165>

© Иванов С. Г., Гурьев М. А., Гурьев А. М., Лыгденов Б. Д., 2023

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ Х12МФ

Abstract. The paper presents the results of a study of brittle fracture of a part made of steel X12MF (D2 AISI). The following general features are characteristic of these steels. The heterogeneity in the distribution of carbides is significant; it increases with an increase in the cross-section of rolled products (forgings) and the content of chromium and carbon; consequently, the mechanical properties in large sections with a diameter of more than 40-50 mm are reduced. The results obtained indicate an "under-release" of the product (the release temperature is below 180° C), either due to insufficient exposure time during release, or (most likely) due to a combination of reasons consisting in a decrease in the actual release temperature and insufficient exposure time.

Keywords: alloy steel, quenching, tempering, microstructure, mechanical properties.

For citation: Guriev, M. A., Ivanov, S. G., Guriev, A. M. & Lygdenov, B. D. (2023). Influence of technological parameters of heat treatment on the structure and properties of critical parts made of steel X12MF. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 230-237. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.030. EDN: <https://elibrary.ru/EBVHEG>.

В настоящее время все больше возрастает число легированных сталей, различающихся по составу, свойствам и особенностям обработки и применения. Этот процесс закономерен, потому что возрастает число новых конструкционных и других материалов, требующих новых подходов к их механической обработке [1].

Высокую прочность стали, в отличие от твердости, должны иметь не только в поверхностном контактирующем слое, но и на участках, в которых возникает наибольший изгибающий и крутящий моменты. Это, например, основание зуба шестерен. Прочность в поверхностном слое нужна в связи с тем, что износ часто является поверхностным явлением, приводящим в первую очередь к деградации геометрических параметров поверхностей [2].

При термической обработке также необходимо учитывать, что полный либо частичный распад мартенсита при отпуске или нагреве, снижающий твердость, может повышать прочность. Особенно важно влияние зерна и карбидов. Механические свойства

(прочность, пластичность и т.д.) сталей снижаются пропорционально с увеличением зерна и усилением неоднородности в распределении карбидов [3–5].

Производство деталей ответственного назначения требует высочайшего уровня соблюдения технологических параметров термической обработки, формирующей окончательные свойства изделия и внимательности от исполнителей на всех этапах, начиная от входного контроля заготовки до выходного контроля готового изделия. Это позволяет предотвратить возможные катастрофические последствия применения бракованного изделия.

В работе представлены результаты исследования хрупкого разрушения ножа измельчителя, изготовленного из стали Х12МФ. Нож представляет собой зубчатый диск диаметром 600 мм и толщиной 50 мм, подвергнутый термической обработке, с радиальной сквозной трещиной. Фотографии фрагмента ножа со сквозной трещиной и отобранный из него образец по месту выхода трещины на внешнюю поверхность детали представлены на рисунке 1.

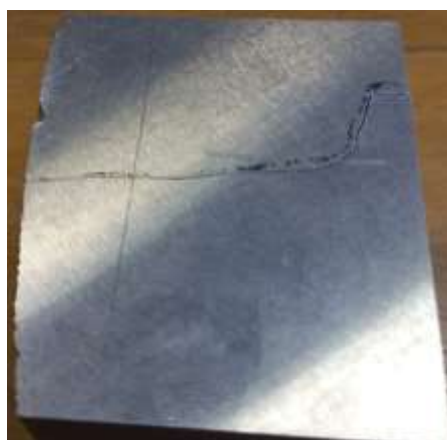
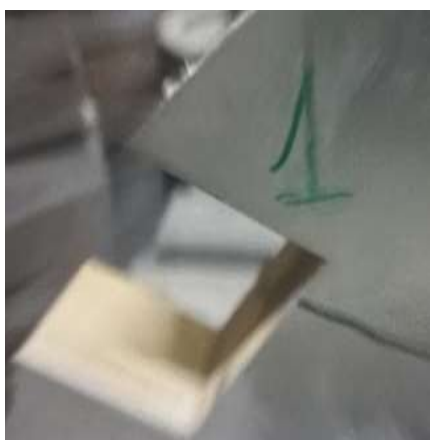


Рисунок 1 – Представленные на исследование образцы

Figure 1 – Samples submitted for research

Для исследований использовалось оборудование: эмиссионный спектрометр SOLARIS CCD Plus заводской номер 15110SCP07, металлографический микроскоп Karl Zeiss Axio Observer Z1m с программным комплексом «Thixomet Pro», универсальный твердомер МН 6, отрезной станок модель Q-2, прецизионный станок для вырезки микрошлифов «MICRACUT-201», автоматический шлифовально-полировальный станок «DIGIPREP».

Визуальный осмотр представленных на исследование образцов даёт основание считать, что наиболее вероятными причинами появления трещин могли быть неправильная

Таблица 1 – Химический состав стали

Table 1 – Chemical composition of steel

Элемент	Исследуемые образцы	Сталь X12МФ по ГОСТ 5950 - 2000
	Содержание элемента, %	
C	1,482±0,0015	1,45–1,65
Si	0,275±0,0020	0,10–0,40
Mn	0,373±0,0026	0,15–0,45
P	0,0230±0,0006	≤0,03
S	0,0103±0,00015	≤0,03
Cr	12,103±0,074	11–12,5
Ni	0,241±0,0036	≤0,40
Cu	0,065±0,0006	≤0,30
W	0,064±0,0020	≤0,20
Mo	0,436±0,0040	0,4–0,6
Al	0,027±0,0010	–
Ti	<0,001	≤0,03
Nb	0,045±0,0006	–
V	0,182±0,0029	0,15–0,3

Для исследования микроструктуры из представленного образца абразивной резкой на прецизионном металлографическом станке «Micra Cut-201» были получены металлографические темплеты, из которых вырезали заготовки для микрошлифов в поперечном и продольном направлении относительно оси образцов (рисунок 2).

Макроструктуру и карбидную неоднородность стали исследовали при помощи металлографического программно-аппаратного комплекса «Thixomet PRO» согласно ГОСТ 5950-2000 с применением автоматизированных методик. По данным таблицы 6 ГОСТ 5950–2000, предельно допустимой нормой карбидной неоднородности для полосового проката толщиной свыше 40 до 60 мм включительно из стали X12МФ является балл карбидной неоднородности «5» [9–14].

термообработка (несоблюдение технологических параметров), либо несоблюдение параметров шлифовки боковых поверхностей диска, либо (как вариант) комбинация вышеперечисленных факторов в той или иной мере [6–8]. Других видимых дефектов, кроме сквозных трещин, представленные к осмотру образцы дисков не имеют.

Химический состав стали представленный на исследование образцов (таблица 1) показал, что они изготовлены из стали X12МФ по ГОСТ 5950-2000 «Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие технические условия».

Для этих сталей характерны следующие общие особенности. Неоднородность в распределении карбидов значительна; она усиливается с увеличением сечения проката (поковки) и содержания хрома и углерода; следовательно, механические свойства в крупных сечениях диаметром более 40–50 мм пониженные. Растворение карбидов M_7C_3 (и $M_{23}C_6$), а также концентрация углерода и хрома в твердом растворе сильно возрастают с увеличением температуры закалки. Вследствие этого значительнее, чем в других сталях, снижаются температуры начала и конца мартенситного превращения и растет количество остаточного аустенита. При температурах нагрева, обеспечивающих получение наибольшей твердости, стали сохраняют мелкое зерно.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ Х12МФ

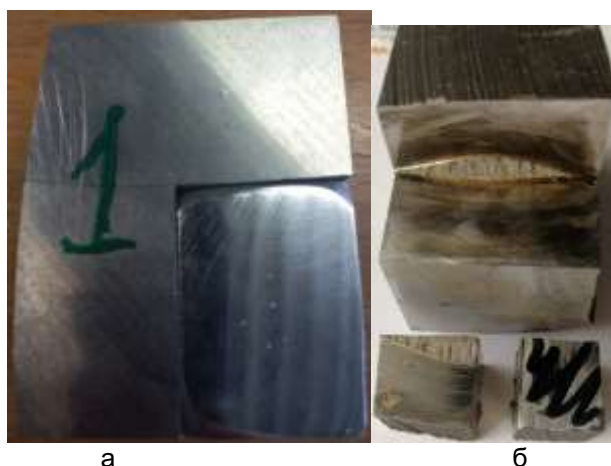


Рисунок 2 – Образцы с отрезанным темплетом для изготовления микрошлифов (а) и заготовки микрошлифов (б)

Figure 2 – Samples with a cut-off template for the manufacture of micro-grinders (a) and the preparation of micro-grinders (b)

Проведенный по поперечному и продольному шлифам анализ карбидной неоднородности показал усредненный балл карбидной неоднородности, равный $3,66 \pm 0,17$. При максимально допустимом значении балла карбидной неоднородности определен

средний балл карбидной неоднородности меньше максимально допустимого значения. Распределение наихудших значений карбидной неоднородности по совокупности шлифов представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Распределение карбидов в объеме металла

Table 2 – Distribution of carbides in the volume of metal

Поперечный микрошлиф		Продольный микрошлиф	
Балл карбидной неоднородности	Число полей, имеющих соответствующий балл	Балл карбидной неоднородности	Число полей
3	7	3	4
4	4	4	6
5	1	5	2
среднее	3,49	среднее	3,83

* Общая отсмотренная площадь полей составила $52,3 \text{ мм}^2$, при площади одного поля $4,36 \text{ мм}^2$.

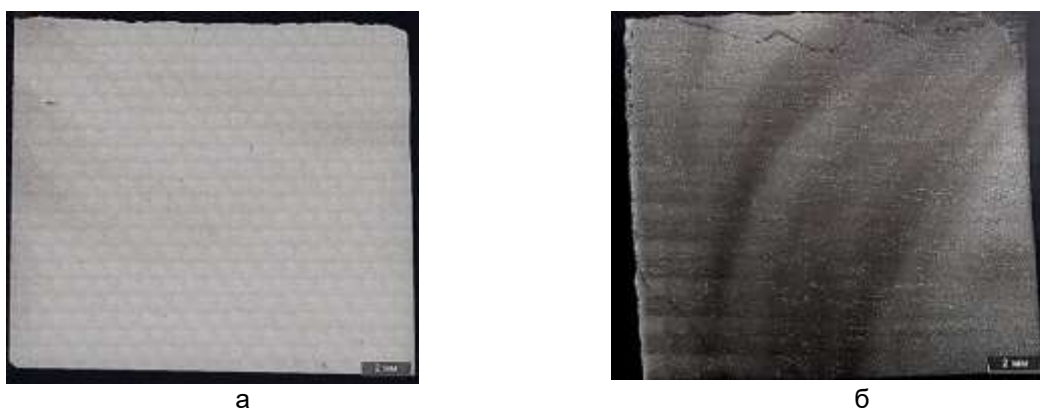


Рисунок 3 – Макроструктура образцов поперек (а) и вдоль (б) направлениях прокатки

Figure 3 – Macrostructure of samples across (a) and along (b) rolling directions

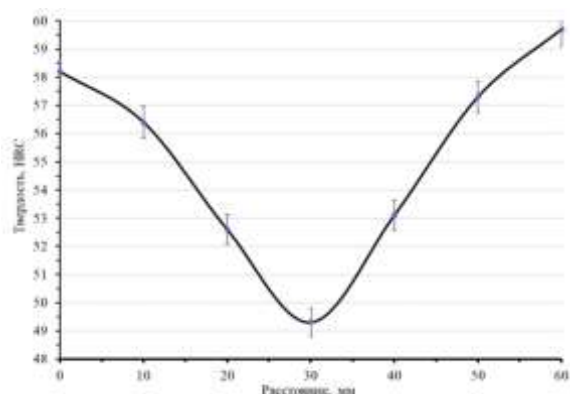


Рисунок 4 – Распределение твердости по поперечному сечению диска

Figure 4 – Hardness distribution over the cross section of the disk

Исследование распределения твердости закаленного материала диска по поперечному сечению дало следующую картину распределения твердости (рисунок 4).

Из представленного на рисунке 4 графика распределения твердости видно, что имеется значительный перепад твердости в направлении от поверхности диска к сердцевине: твердость на поверхности диска составляет $59,2 \pm 1$ HRC,

тогда как в сердцевине (на глубине приблизительно 30 мм от поверхности диска) значение твердости составляет $49,3 \pm 2$ HRC. Такое распределение твердости свидетельствует о недогреве детали либо о недостаточном времени выдержки при нагреве под закалку. Справочные значения прокаливаемости стали X12MФ составляют от 80 до 100 мм, что позволяет сделать вывод о том, что при оптимальной температуре нагрева и оптимальном времени выдержки деталь должна иметь одинаковую твердость на протяжении всего поперечного сечения – флуктуации твердости на всем поперечном сечении не должны превышать значения ± 1 HRC [15–19].

Проведенные микроструктурные исследования на образцах, вырезанных из сердцевины и края диска, в направлении поперечного сечения показали наличие игл мартенсита в приповерхностной области и практически полное их отсутствие в сердцевине поперечного сечения образца диска, мелкодисперсных карбидов хрома, имеющих ориентировочные размеры от 500 до 850 нм и выделяющихся из твердого раствора при его отпуске (рисунок 5).



а



б

Рисунок 5 – Микроструктура различных областей поперечного сечения диска, $\times 1000$:

- а) – микроструктура подповерхностной зоны поперечного сечения диска,
- б) – микроструктура сердцевины поперечного сечения диска

Figure 5 – Microstructure of various areas of the cross-section of the disk, $\times 1000$:

- a) – microstructure of the subsurface zone of the cross-section of the disk,
- b) – microstructure of the core of the cross-section of the disk

Как видно из представленных фотографий, микроструктура (рисунок 5), в приповерхностной области в металлической матрице наблюдаются иглы мартенсита, что свидетельствует о «недоотпуске» изделия (температура отпуска ниже 180 °С), либо по

причине недостаточности времени выдержки при отпуске, либо (что наиболее вероятно) – по совокупности причин, заключающихся в понижении фактической температуры отпуска и недостаточного времени выдержки. Дополнительным фактором, свидетельствующим о

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ Х12МФ

несоблюдении параметров отпуска, свидетельствует пониженное, а в сердцевине – практически полное отсутствие мелкодисперсных субмикронных выделений карбидов [18–24]. Также малое количество мелкодисперсных карбидов может быть вызвано недогревом сердцевины детали, вследствие чего не произошло растворение карбидной фазы, о недогреве также косвенно свидетельствует

низкая твердость сердцевины изделия. Аналогичные исследования, проведенные на фрагменте, имеющем равномерно распределенную по поперечному сечению твердость 58 ± 1 HRC, показали равномерную микроструктуру с большим распределением мелкодисперсных карбидов по площади шлифа, представлены на рисунке 6.

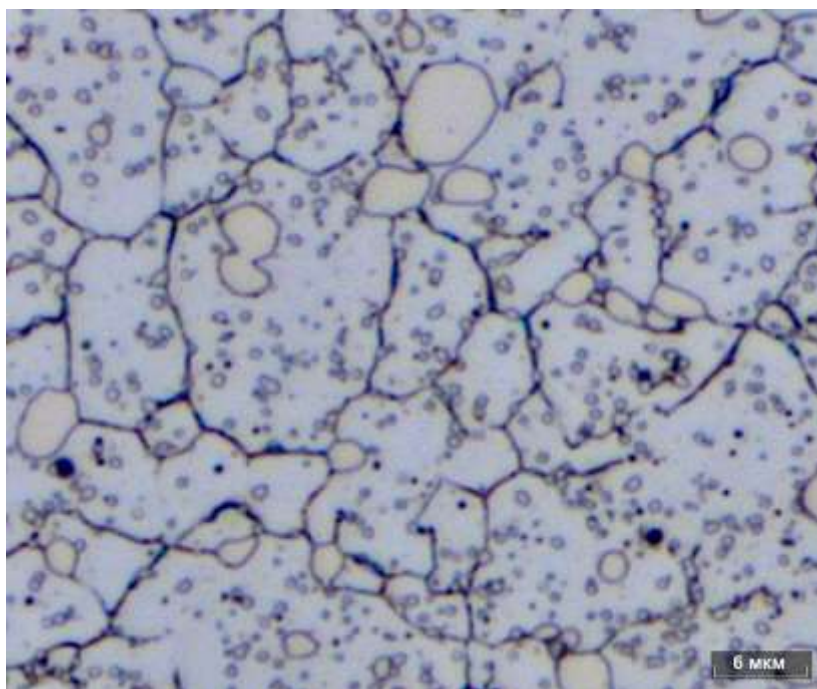


Рисунок 6 – Микроструктура фрагмента диска со сквозной прокалкой на всем сечении, x1000

Figure 6 – Microstructure of a disk fragment with through-piercing on the entire cross section, x1000

Как видно из представленного рисунка 6, при правильно проведенной закалке со сквозным прогревом детали на всем сечении и правильно проведенном отпуске, явно видимые мартенситные иглы отсутствуют на всем протяжении поперечного сечения изделия. А концентрация мелкодисперсных карбидов размером 500–800 нм составляет 1280 ± 140 шт/мм² против 968 ± 70 шт/мм² для структуры, приведенной на рисунке 5, а и 680 ± 30 шт/мм² для структуры, приведенной на рисунке 5, б.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что относительно малое в приповерхностных сечениях детали, а на глубине 30 мм от поверхности детали, практически полное отсутствие субмикронных выделений карбидов (имеющих размеры 500–850 нм) свидетельствует о комплексном нарушении режимов нагрева под закалку и последующего отпуска детали. Очевидно занижение температурно-временных параметров нагрева и выдержки при температуре нагрева.

Недостаточный отпуск детали приводит к неполному снятию закалочных напряжений, что, в свою очередь, вполне может привести к появлению и последующему распространению по всему сечению детали трещин при окончательной механической обработке детали (в данном конкретном случае – шлифовании). Распространению сквозных трещин также способствует неоднородное структурно-фазовое состояние материала детали по поперечному сечению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. 5-е изд. М.: Металлургия, 1983. С. 527.
2. Лахтин Ю.М. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallorv : uchebnik dlya vuzorv / Ю.М. Лахтин. 4-е изд. М. : Metallurgiya, 1993. 448 с.
3. Гуляев А.П. Metallovedenie : uchebnik dlya vuzorv / А.П. Гуляев. М. : Metallurgiya, 1986. 544 с.
4. Лахтин Ю.М. Основы metallovedeniya: uchebnik dlya tekhnikumorv / Ю.М. Лахтин. М. : Metallurgiya, 1988. 320 с.

5. *Материаловедение : учеб. пособие / под общ. ред. Л.Г. Петровой, Г.В. Гладовой, О.В. Чудиной. М. : МАДИ (ГТУ), 2008. 288 с.*

6. Остроух А.В. *Электронные образовательные ресурсы в профессиональном образовании : монография / А.В. Остроух, Н.Е. Суркова. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 184 с. ISBN 978-3-8433-2216-4.*

7. Vander Voort G., Pakhomova O., Kazakov A., Evaluation of Normal Versus Non-Normal Grain Size Distributions // *Materials Performance and Characterization*. 2016. № 5. P. 521–534.

8. Kazakov A., Kiselev D. Industrial Application of Thixomet Image Analyzer for Quantitative Description of Steel and Alloys Microstructure // *Microsc. Microanal.* 2015. 21 (Suppl 3). P. 457–458.

9. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Русакова А.В., Гурьев М.А., Старостенков М.Д. Микроструктура поверхности многокомпонентных диффузионных покрытий на основе бора // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2013. Т. 10, № 1. С. 130–133.

10. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Земляков С.А., Гурьев М.А., Романенко В.В. Особенности методики подготовки образцов для автоматического анализа карбидной фазы стали X12Ф1 после цементации в вакууме с применением программного комплекса "Thixomet PRO" // *Ползуновский вестник*. 2020. № 2. С. 165–168.

11. Гурьев А.М., Гурьев М.А., Земляков С.А., Иванов С.Г. Выявление особенностей морфологии и фазового состава сталей методами специального металлографического травления // В сб. тезисов XVI Международной школы-семинара «Эволюция дефектных структур в конденсированных средах». Под ред. М.Д. Старостенкова. 2020. С. 83–84.

12. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Земляков С.А., Гурьев М.А. Методика пробоподготовки образцов высоколегированных сталей для автоматического анализа карбидной фазы // *Ползуновский вестник*. 2020. № 3. С. 102–105.

13. *ASM Handbook // Volume 9: Metallography and Microstructures*. 2004.

14. Kazakov A. Industrial application of thixomet image analyzer for quantitative description of steel and alloy's microstructure. A. Kazakov, D. Kiselev // *Metallogr. Microstruct. Anal.* 2016. V. 5. P. 294–301.

15. Гурьев А.М., Козлов Э.В., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А. Особенности формирования диффузионного слоя при термоциклическом борировании углеродистой стали // *Эволюция дефектных структур в конденсированных средах. Сб. тезисов докладов 5-ой Международной школы-семинара*. 2000. С. 149–150.

16. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Черных Е.В., Иванова Т.Г. Химико-термическая обработка материалов для режущего инструмента // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2015. Т. 58. № 8. С. 578–582.

17. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Черных Е.В. Структурные факторы упрочнения углеродистой инструментальной стали У8А при циклическом тепловом воздействии // *Фундамен-*

тальные проблемы современного материаловедения. 2021. Т. 18. № 4. С. 494–502.

18. Гурьев А.М., Шаметкина О.В., Гурьева О.А., Колядин А.А. Высокоэффективная технология термоциклического упрочнения конструкционных и инструментальных сталей // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2004. № 2 (23). С. 10–12.

19. Околович Г.А., Евтушенко А.Т., Гурьев А.М., Климов Д.А., Охрименко С.А., Шилова В.М. Способ термоциклической обработки высокохромистой инструментальной стали на вторичную твердость // *Патент на изобретение RU 2192485 C2*, 10.11.2002. Заявка № 2000127998/02 от 09.11.2000.

20. Гурьев А.М. О разработке высокоэффективной технологии термоциклического упрочнения инструментальных сталей // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2000. № 2. С. 25.

21. Гурьев А.М., Околович Г.А., Чепрасов Д.П., Земляков С.А. Способ термоциклической обработки инструментальной стали / *Патент на изобретение RU 2131469 C1*, 10.06.1999. Заявка № 98108775/02 от 06.05.1998.

22. Гурьев А.М. Высокоэффективная технология термического упрочнения инструментальных сталей // *Ползуновский альманах*. 1999. № 3. С. 90.

23. Гурьев А.М., Ворошнин Л.Г., Чепрасов Д.П., Рубцов А.А. Способ термоциклической обработки инструментальной стали // *Патент на изобретение RU 2078440 C1*, 27.04.1997. Заявка № 95106172/02 от 19.04.1995.

24. Шматов А.А., Ворошнин Л.Г., Гурьев А.М. Способ термической обработки инструментальных сталей / *Патент на изобретение RU 2017838 C1*, 15.08.1994. Заявка № 4933944/02 от 21.05.1991.

Информация об авторах

М. А. Гурьев – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование» АлтГТУ.

С. Г. Иванов – доктор технических наук, заведующий лабораторией Центра коллективного пользования лабораторно-исследовательским оборудованием Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

А. М. Гурьев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Начертательная геометрия и графика» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, профессор Уханьского текстильного университета (КНР).

Б. Д. Лыгденов – доктор технических наук, профессор кафедры «Маталловедение и технологии обработки материалов» Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления, профессор Уханьского текстильного университета (КНР).

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ Х12МФ

REFERENCES

1. Geller, Yu.A. Tool steels. 5th ed. M. : Metallurgy, 1983. p. 527.
2. Lakhtin, Yu.M. Metallovedenie and thermal processing of metals: textbook for universities / Yu.M. Lakhtin. 4th ed. M. : Metallurgy, 1993. 448 p.
3. Gulyaev, A.P. Metallovedenie: textbook for universities / A.P. Gulyaev. M.: Metallurgy, 1986. 544 p.
4. Lakhtin, Yu.M. Fundamentals of metal science: textbook for technical schools / Yu.M. Lakhtin. M.: Metallurgy, 1988. 320 p.
5. Materials science: textbook / under the general editorship of L.G. Petrova, G.V. Gladova, O.V. Chudina. M.: MADI (GTU), 2008. 288 p.
6. Ostroukh, A.V. Electronic educational resources in professional education: monograph / A.V. Ostroukh, N.E. Surkova. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 184 p. ISBN 978-3-8433-2216-4.
7. Vander Voort, G., Pakhomova, O., Kazakov, A. Evaluation of Normal Versus Non-Normal Grain Size Distributions // Materials Performance and Characterization. 2016. No 5. P. 521-534.
8. Kazakov, A., Kiselev, D. Industrial Application of Thixomet Image Analyzer for Quantitative Description of Steel and Alloys Micro-structure // Microsc. Microanal. 2015. 21 (Suppl 3). P. 457-458.
9. Ivanov, S.G., Guryev, A.M., Rusakova, A.V., Guryev, M.A., Starostenkov, M.D. Microstructure of the surface of multicomponent diffusion coatings based on boron // Fundamental problems of modern materials science. 2013. Vol. 10, No. 1. pp. 130-133.
10. Ivanov, S.G., Guryev, A.M., Zemlyakov, S.A., Guryev, M.A., Romanenko, V.V. Features of the method of sample preparation for automatic analysis of the carbide phase of steel X12F1 after cementation in vacuum using the Thixomet PRO software package // Polzunovsky vestnik. 2020. No. 2. pp. 165-168.
11. Guryev, A.M., Guryev, M.A., Zemlyakov, S.A., Ivanov, S.G. Identification of features of morphology and phase composition of steels by methods of special metallographic etching // In the collection of theses of the XVI International School-seminar "Evolution of defective structures in concentrated media". Edited by M.D. Starostenkov. 2020. pp. 83-84.
12. Ivanov, S.G., Guryev, A.M., Zemlyakov, S.A., Guryev, M.A. Method of sample preparation of samples of high-alloy steels for automatic analysis of the carbide phase // Polzunovsky vestnik. 2020. No. 3. pp. 102-105.
13. ASM Handbook // Volume 9: Metallography and Microstructures. 2004.
14. Kazakov, A. Industrial application of thixomet image analyzer for quantitative description of steel and alloy's microstructure / A. Kazakov, D. Kiselev // Metallogr. Microstruct. Anal. 2016. V. 5. P. 294-301.
15. Guryev, A.M., Kozlov, E.V., Ignatenko, L.N., Popova, N.A. Features of the formation of the diffusion layer during thermocyclic boron of carbon steel // Evolution of defective structures in condensed media. Collection of abstracts of the 5th International School-Seminar. 2000. pp. 149-150.
16. Guryev, A.M., Ivanov, S.G., Guryev, M.A., Chernykh, E.V., Ivanova, T.G. Chemical and thermal processing of materials for cutting tools // News of higher educational

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 12.01.2023; одобрена после рецензирования 13.05.2023; принята к публикации 11.06.2023.

The article was received by the editorial board on 12 Jan 2022; approved after editing on 13 May 2023; accepted for publication on 11 June 2023.

institutions. Ferrous metallurgy. 2015. Vol. 58. No. 8. pp. 578-582.

17. Guryev, A.M., Ivanov, S.G., Guryev, M.A., Chernykh, E.V. Structural factors of hardening of carbon tool steel U8A under cyclic thermal action // Fundamental problems of modern material management. 2021. Vol. 18. No. 4. pp. 494-502.

18. Guryev, A.M., Shametkina, O.V., Gurieva, O.A., Kolyadin, A.A. Highly efficient technology of thermocyclic hardening of structural and tool steels // Metal processing (technology, equipment, tools). 2004. No. 2 (23). pp. 10-12.

19. Okolovich, G.A., Yevtushenko, A.T., Guryev, A.M., Klimov, D.A., Okhrimenko, S.A., Shilova, V.M. Method of thermocyclic treatment of high-chromium tool steel for secondary hardness // Patent for the invention RU 2192485 C2, 10.11.2002. Application No. 2000127998/02 dated 09.11.2000.

20. Guryev, A.M. On the development of high-efficiency technology of thermocyclic hardening of tool steels // News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy. 2000. No. 2. p. 25.

21. Guryev, A.M., Okolovich, G.A., Cheprasov, D.P., Zemlyakov, S.A. Method of thermocyclic processing of tool steel / Patent for the invention RU 2131469 C1, 10.06.1999. Application. No. 98108775/02 dated 06.05.1998.

22. Guryev, A.M. Highly efficient technology of thermal hardening of tool steels // Polzunovsky Almanac. 1999. No. 3. p. 90.

23. Guryev, A.M., Voroshnin, L.G., Cheprasov, D.P., Rubtsov, A.A. Method of thermocyclic treatment of tool steel // Patent for invention RU 2078440 C1, 04/27/1997. Application No. 95106172/02 dated 04/19/1995.

24. Shmatov, A.A., Voroshnin, L.G., Guriev, A.M. Method of heat treatment of instrumental steels / Patent for the invention RU 2017838 C1, 15.08.1994. Application No. 4933944/02 dated 21.05.1991.

Information about the authors

M.A. Guryev - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Polzunov Altai State Technical University.

S.G. Ivanov - Doctor of Technical Sciences, Head of the Laboratory of the Center for Shared Use of Laboratory and Research Equipment, Polzunov Altai State Technical University.

A.M. Guryev - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Descriptive Geometry and Graphics, Polzunov Altai State Technical University, Professor of the Wuhan Textile University (PRC).

B.D. Lygdenov - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metallurgy and Materials Processing Technologies of East Siberia State University of Technology and Management, Professor of Wuhan Textile University (PRC).