



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-100-104>
УДК 621.78

Поступила 09.03.2021
Received 09.03.2021

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ НЕСТАНДАРТНЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Д. М. БЕРДИЕВ, А. А. ЮСУПОВ, Ташкентский государственный технический университет
им. И. Каримова, г. Ташкент, Узбекистан, ул. Университетская, 2. E-mail: berdiyev_mf@mail.ru

Использование нестандартных режимов термической обработки увеличивает плотность дислокаций в кристаллическом строении α -фазы и повышает износостойкость углеродистых, малолегированных сталей в различных условиях трения, что сопоставимо с результатами при нагреве до стандартной температуры ($A_{c3} + 30-50$ °C). Определена предварительная экстремальная температура нагрева. После повторной закалки при стандартной температуре и низком отпуске износостойкость сталей при различных видах трения повышается до 40% по сравнению со стандартной закалкой.

Ключевые слова. Износостойкость, термическая обработка, твердость, углеродистые и малолегированные стали, плотность дислокаций.

Для цитирования. Бердиев, Д. М. Повышение износостойкости стальных изделий методом нестандартных режимов термической обработки / Д. М. Бердиев, А. А. Юсупов // Литье и металлургия. 2021. № 2. С. 100–104. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-100-104>.

IMPROVING THE WEAR RESISTANCE OF STEEL PRODUCTS BY USING NON-STANDARD HEAT TREATMENT MODES

D. M. BERDIEV, A. A. YUSUPOV, Tashkent State Technical University named after I. Karimov, Tashkent, Uzbekistan, 2, Universitetskaya str. E-mail: berdiyev_mf@mail.ru.

The use of non-standard modes of heat treatment increases the density of dislocations in the crystal structure of the α -phase and increases the wear resistance of carbon, low-alloy steels under various friction conditions, which is comparable to the results when heated to a standard temperature ($A_{c3} + 30-50$ °C). The preliminary extreme heating temperature is determined. After re-quenching at standard temperature and low tempering, the wear resistance of steels under various types of friction increases by up to 40% compared to standard quenching.

Keywords. Wear resistance, heat treatment, hardness, carbon and low-alloy steels, dislocation density.

For citation. Berdiev D. M., Yusupov A. A. Improving the wear resistance of steel products by using non-standard heat treatment modes. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 2, pp.100–104. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-100-104>.

Стандартные режимы термической обработки (ТО) металлических изделий обеспечивают, как правило, достаточно высокие механические свойства, однако в ряде случаев этого недостаточно. В частности, это касается вязкости металла изделия [1], которая определяет его надежность.

Исследованиями установлено, что все нестандартные режимы ТО стали базируются на фундаментальных закономерностях фазовых превращений [2], суть которых заключается в том, что путем предварительной высокотемпературной ТО достигается высокий уровень дефектности кристаллического строения стали, что в зависимости от завершенности структурных превращений при повторном нагреве позволяет сильнее измельчить зерно [3]. При этом вязкость стали повышается при одновременном повышении прочности. При сохранении высокой плотности дислокаций (ПД) повышается износостойкость [4, 5].

В данной работе рассматривается механизм α - γ - α -превращений, а также отмечается, что при высоких температурах нагрева существует экстремальная температура, при которой в твердый раствор (аустенит) переходят атомы тугоплавких примесных фаз. В этом случае при охлаждении (γ - α -превращение) повышается ПД в α -фазе. При повторной фазовой перекристаллизации часть этих дислокаций сохраняется. Подробный аналитический обзор работ [6, 7] в области высокотемпературной ТО с двойной фазовой перекристаллизацией показал, что она получила достаточное применение для повышения

износостойкости. Однако теоретических обоснований для реализации разных режимов нестандартных технологий оказалось недостаточно [7].

Цель данной работы – изучить особенности структурообразования стали при нестандартных режимах ТО, которые повышают износостойкость стальных изделий без существенных дополнительных затрат.

Материалы и методика исследования

Исследовали образцы сталей 35, 45, 40X, 65Г и У8 [8]. В качестве эталонного материала использовали образцы армко-железа. Образцы для ТО испытывали при разных температурах: для каждой стали выбирали начальную температуру из расчета выше критической точки температуры нагрева A_{c3} (или A_{c1}) + 30–50 °С, а затем при температурах около 900, 1000, 1100, 1150 и 1200 °С. Образцы охлаждали на воздухе, в воде или масле, а также вместе с печью при ее остывании. Таким образом, создавали термическую предысторию стали. Повторную фазовую перекристаллизацию всегда проводили с нагревом до точки A_{c3} (или A_{c1}) + 30–50 °С для каждой стали.

Металлографический анализ проводили на микроскопе МИМ-8М [9], рентгеноструктурный – на установке ДРОН-2,0. Определяли состояние тонкой структуры стали (ПД), количество остаточного аустенита, период кристаллической решетки, количество углерода в фазах закаленной стали [10]. Испытания на износостойкость осуществляли при трении скольжения по закрепленному абразивному материалу на машине Х4-Б [11], по незакрепленному абразивному материалу – на машине ПВ-7 [12], при скольжении металл-по-металлу – на машине трения СМЦ-2, при трении качения с проскальзыванием – на машине трения МИ-1 [13]. Эти виды трения встречаются практически при движении всех деталей машин и инструментов.

Из работы [6] известно, что с повышением температуры нагрева наблюдается рост аустенитного зерна. Однако во всех случаях имеет место экстремальная температура нагрева (1100 °С), при которой после охлаждения можно зафиксировать максимальную ПД. Изменяется ПД при повышении температуры отпуска. При отпуске выше 200 °С наблюдается общее резкое снижение ПД, но при закалке с экстремальной температурой 1100 °С это снижение намного меньше [7]. Чем выше температура отпуска после закалки стали (от 200 до 600 °С), тем больше разность ПД в образцах, закаленных при экстремальной и принятой для данной стали температурах. Следовательно, дислокации после закалки при экстремальной температуре термически более устойчивы.

Плотность дислокаций в кристаллической структуре стали увеличивается при ТО с предварительным нагревом до экстремальных температур. При такой нормализации ПД конструкционных сталей увеличивается в 1,5–2,5 раза (стали 40X от 150 до 258%). Однако по абсолютному значению (ρ , 10^9 см⁻²) это на два порядка меньше, чем после закалки [7]. В закаленном состоянии (ρ , 10^{14} см⁻²) эта разница достигает от 28 до 50–60%. Однако с ростом аустенитного зерна снижаются пластичность и вязкость стали. Вместе с тем, после нормализации всегда следует упрочняющая закалка с отпуском. При повторной фазовой перекристаллизации при нагреве под закалку температура составляла A_{c3} (или A_{c1}) + 30–50 °С.

Исследовали ранее не изученные закономерности:

- соответствует ли увеличение ПД в кристаллическом строении сталей при их ТО с экстремальными температурами нагрева повышению износостойкости сталей;
- какова эффективность режимов ТО с экстремальными температурами при разных видах трения: скольжении по закрепленному и незакрепленному абразивному материалу, металл-по-металлу и качению с проскальзыванием.

Результаты исследования приведены в таблице.

Трение скольжения по закрепленному абразивному материалу – самый жесткий способ испытания [10]. Испытывали образцы сталей с очень малым содержанием остаточного аустенита. Предварительно нормализованные при разных температурах нагрева образцы повторно нагревали до одной температуры A_{c3} (или A_{c1}) + 30–50 °С, проводили закалку и низкий отпуск. Установили, что при предварительной нормализации с температурой 1150 °С сравнительное повышение ПД составило от 20 до 39%, а износ уменьшился на 10–15%.

Трение скольжения по незакрепленному абразивному материалу – трение, присущее работе всех почвообрабатывающих сельскохозяйственных машин [12]. Образцы сталей предварительно нормализовали выше температуры нагрева A_{c3} (или A_{c1}) + 30–50 °С, а далее стали нагревали до 900 и 1200 °С. Время нагрева 20 мин. Повторный нагрев образцов всех сталей – до температуры A_{c3} (или A_{c1}) + 30–50 °С вне зависимости от температуры предварительной нормализации, далее закалка и отпуск.

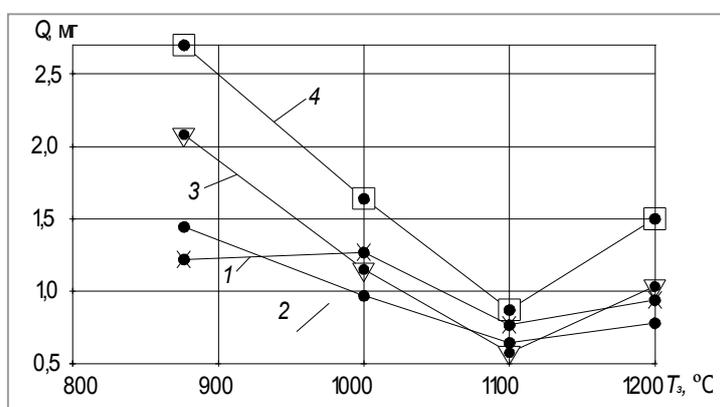
Влияние температуры нагрева предварительно нестандартных ТО на плотность дислокаций и величину износа сталей

Марка стали	Предварительная температура нагрева при нестандартной ТО, °С	Плотность дислокаций, $\rho \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$	Температура нагрева стандартной ТО, °С	Плотность дислокаций, $\rho \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$	Относительная износостойкость, $Q_{\text{ннн}}/Q_{\text{ст}}$
Предварительная нормализация, после повторной закалки с температуры A_{c_3} (или A_{c_1}) + 30–50 °С и отпуска 200 °С					
35	1150	1,61	870	1,12	0,84
45	1150	1,97	850	1,45	0,78
40X	1150	2,28	870	1,89	0,72
65Г	1150	3,7	830	1,9	0,7
У8	1150	3,2	800	2,21	0,6
Прямая закалка с различных температур нагрева и отпуска 200 °С					
35	1100	1,81	870	1,21	0,77
45	1100	2,9	860	1,89	0,65
40X	1100	3,2	870	2,1	0,65
65Г	1100	3,8	830	1,98	0,62
У8	1100	4,0	800	2,6	0,6

Уменьшение износа при предварительной нормализации с экстремальной температурой нагрева (1150 и 1100 °С) по сравнению с температурой первого нагрева оказалось значимым. В зависимости от температуры отпуска износ уменьшился для стали 35 на 14–20%, для стали 45 – на 19–25, для стали 65Г – на 20–30, для стали У8 – на 20–32%.

При трении скольжения металл-по-металлу исследовали прямую закалку после нагрева стали с разными температурами. Прямую закалку используют, если величина аустенитного зерна не имеет большого значения или при быстром нагреве.

Испытания при трении скольжения роликов из стали 40X по буксе из серого чугуна со смазыванием выявили уменьшение на 30–48% износа Q после закалки с экстремальной температурой $T_z = 1100$ °С по сравнению с закалкой при обычной температуре ($A_{c_3} + 30–50$ °С) (см. рисунок).



Зависимость износа Q стали 40X при трении со смазыванием от температуры T_z закалки при температуре отпуска $T_o = 200$ °С (1), 350 (2), 450 (3) и 600 °С (4)

Испытания образцов (роликов) из сталей 45, 40X и У8 без смазывания при их трении по закаленной буксе показали уменьшение износа после закалки с экстремальной температурой нагрева (при одинаковой твердости) для стали 45 на 31–42%, для стали 40X – на 40–43%, для стали У8 – на 32–40%.

Образцы стали 40X были предварительно нормализованы с разными температурами нагрева. Все образцы повторно нагревали при 870 °С, закалку проводили в масле, отпуск при температуре от 200 до 600 °С.

Результаты испытаний при трении скольжения со смазыванием и без смазывания полностью соответствовали закономерностям изменения тонкой структуры, приведенным в работе [7]. Уменьшение износа образцов, термически обработанных по экстремальным режимам, составило 37–45% при трении скольжения со смазыванием, 29–31% – без смазывания.

При трении качения с проскальзыванием заготовки образцов прямой закалки для исследования их изнашивания нагревали выше температуры A_{c_3} (или A_{c_1}) + 30–50 °С до 1200 °С при выдержке

соответственно 20–30 мин и 2 ч. После механической обработки отпуск одной части образцов осуществляли при 200 °С, а второй – при 600 °С. Испытания показали, что после закалки с экстремальными температурами (1100 °С при выдержке 20 мин и 1000 °С при выдержке 2 ч) и отпуска при 200 °С наблюдалось уменьшение износа соответственно на 32–39 и 13–16%. После отпуска при 600 °С износ увеличился с ростом аустенитного зерна.

При разработке режимов ТО с двойной фазовой перекристаллизацией приходится учитывать время нагрева для предварительных закалки и нормализации в зависимости от размеров детали. Если предварительная ТО включает в себя закалку с разных температур и промежуточный отпуск при 450 °С, то после повторной закалки при обычно принимаемой температуре нагрева (870 °С для стали 40X) минимальный износ наблюдается при температуре первой закалки 1200 °С. Износ уменьшился на 43%.

Если предварительная ТО включает в себя нормализацию с разных температур нагрева, то после повторного нагрева до обычно принятых температур (850 °С для стали 45 и 870 °С для стали 40X) и последующей закалки с отпуском уменьшение износа также наблюдается при температуре предварительной нормализации 1200 °С. Износ стали 45 уменьшился на 27%, а стали 40X – на 45%. При увеличении времени повторного нагрева уменьшение износа составляет до 15%.

Для повышения износостойкости деталей машин и инструментов используют легированные стали и сплавы, эффективность которых проверяется специальными испытаниями на износ. В качестве эталона выбирается какая-либо сталь, износ образца которой принимается за единицу.

Целью исследований авторов было определение эффективности применения нестандартных технологий ТО. В качестве эталона использовали образец той же стали, термически обработанной по принятым режимам. Как правило, в обоих случаях использовали образцы одинаковой твердости. Даже при таких условиях эффективность нестандартных режимов ТО оказалась значительной. При трении скольжения по закрепленному абразивному материалу (абразивной шкурке) реализуется очень жесткий способ испытания.

Образцы сталей 45, 65Г и У8 проходили предварительную нормализацию при экстремальной температуре нагрева. После повторной фазовой перекристаллизации с температурой A_{c3} (или A_{c1}) + 30–50 °С, закалки и низкого отпуска износ уменьшался соответственно на 16, 15 и 15%.

При трении скольжения по незакрепленному абразивному материалу (кварц пылевидный) для сталей 45, 65Г и У8 износ уменьшился соответственно на 32, 40 и 45%.

При трении скольжения металл-по-металлу после нестандартных режимов ТО износ уменьшился от 30 до 50%; при трении качения с проскальзыванием – в пределах 30–40%.

Выводы

1. При нагреве стали до высоких температур наблюдаются экстремальные температуры, когда после охлаждения формируются структуры с повышенным уровнем (после нормализации) плотности дислокаций или с ее высоким уровнем (после закалки).
2. Предварительная нормализация при экстремальных температурах (1150 °С) и после повторной закалки с температуры A_{c3} (или A_{c1}) + 30–50 °С, низкого отпуска повышает износостойкость при разных видах трения сталей на 25–30%.
3. Прямая закалка с экстремальных температур нагрева (1100 °С) и после низкотемпературного отпуска повышает износостойкость сталей при разных видах трения на 30–40%.
4. Применение нестандартных режимов ТО для упрочнения деталей машин и инструментов, а, следовательно, для повышения их износостойкости позволяет исключить использование высоколегированных сталей, снизить расходы на материалы и будет способствовать локализации производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гребенков С.К., Шацев А.А., Ряпосов И.В. Деформационное упрочнение низкоуглеродистых мартенситных сталей с выраженной структурной наследственностью // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2013. № 11. С. 34–36.
2. Sadovski V.D. Correction of the Course – Grained Structure During Thermal Treatment of Steel // *Heat Treatment and technology of surface coatings. Proceedings of the 7th International Congress on Heat treatment of Materials*. 1990. Vol. 1. December 11–14. P. 10–14.
3. Dyuchenko S.S. Heredity in phase transformation: mechanism of the phenomenon and effect on the properties // *Metall Science and heat treatment*. 2000. Vol. 42. No. 3–4. P. 122–126.
4. Sagardze V.V., Zuev Yu.N., Bondarchuk S.V. Structural heredity in the U – 6 Nb Alloy and Conditions for its Elimination // *The Physics of Materials and Metallography*. 2013. Vol. 114. No. 4. P. 299–307.

5. **Yugai S.S., Kleiner L.M., Shatsov A.A. and N.N. Mitrokhovich.** Structural heredity in low-carbon martensitic steels // *Metall Sciens and teat treatment*. 2004. Vol. 46. No. 11–12. P. 539–542.
6. **Бердиев Д.М., Тошматов Р.К.** Особенности фазовых и структурных превращений конструкционных сталей при нетрадиционных режимах термической обработки // *Вестник машиностроения*. 2020. № 10. С. 63–65.
7. **Berdiev D.M., Toshmatov R.K.** Phase and Structural Transformations of Structural Steels in Nontraditional Heat Treatment // *Russian Engineering Research*. 2021. Vol. 41. No. 1, P. 46–48.
8. **Шишков М.М.** Марочник сталей и сплавов: Справ. Изд. 3-е дополненное. Донецк: Юго-Восток, 2002. 456 с.
9. **Батаев В.А., Батаев А.А., Алхимов А.П.** Методы структурного анализа материалов и контроля качества деталей. М.: Наука, 2007. 224 с.
10. **Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н.** Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: МИСИС, 1994. 328 с.
11. Машина X4-B испытательная установка для исследования изнашивания материалов закрепленным абразивом. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. Киев: Наукова думка, 1979. 185 с.
12. **Тененбаум М.М.** Закономерности абразивного изнашивания деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин // *Трение и износ*. 1980. Т. 1. № 2. С. 357–364.
13. **Гаркунов Д.Н.** Триботехника. М.: Изд-во МСХА, 2005. 356 с.

REFERENCES

1. **Grebenkov S.K., Shatsev A.A., Ryaposov I.V.** Deformatsionnoe uprochnenie nizkouglerodistnykh martensitnykh staley s vnyrajenoj strukturnoy nasledstvennostyu [Strain hardening of low-carbon martensite steels with pronounced structural heredity]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Meteorology and heat treatment of metals*, 2013, no 11, pp. 34–36.
2. **Sadovski V.D.** Correction of the Course – Grained Structure During Thermal Treatment of Steel. Heat Treatment and technology of surface coatings. Proceedings of the 7th International Congress on Heat treatment of Materials, 1990, Vol. 1, December 11–14, pp. 10–14.
3. **Dyuchenko S.S.** Heredity in phase transformation: mechanism of the phenomenon and effect on the properties. *Metall Science and heat treatment*, 2000, vol. 4, no. 3–4, pp. 122–126.
4. **Sagaradze V.V., Zuev Yu.N., Bondarchuk S.V.** Structural heredity in the U – 6 Nb Alloy and Conditions for its Elimination. *The Physics of Materials and Metallography*, 2013, no. 4, pp. 299–307.
5. **Yugai S.S., Kleiner L.M., Shatsov A.A. and N.N. Mitrokhovich.** Structural heredity in low-carbon martensitic steels. *Metall Sciens and teat treatment*, 2004, vol. 46, no. 11–12, pp. 539–542.
6. **Berdiev D.M., Toshmatov R.K.** Osobennosti fazovykh i strukturnykh prevrasheniy konstruksionnykh staley pri netraditsionnykh rejimakh termicheskoy obrabotki [Features of phase and structural transformations of structural steels under unconventional modes of heat treatment]. *Vestnik mashinostroeniya = Bulletin of Mechanical Engineering*, 2020, no. 10, pp. 63–65.
7. **Berdiev D.M., Toshmatov R.K.** Phase and Structural Transformations of Structural Steels in Nontraditional Heat Treatment. *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 41, no. 1, pp. 46–48.
8. **Shishkov M.M.** *Marochnik staley i splavov* [Grade list of steels and alloys]. Spravochnk [Guide]. Izd. 3-e dopolnennoe. Donetsk, Yugo-Vostok Publ., 2002. 456 p.
9. **Bataev V.A., Bataev A.A., Alximov A.P.** *Metodny strukturnogo analiza materialov i kontrolya kachestva detaley* [Methods of structural analysis of materials and quality control of parts]. Moscow, Nauka Publ., 2007. 224 p.
10. **Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastorguev L.N.** *Rentgenograficheskiy i elektronno-opticheskiy analiz* [X-ray and electron-optical analysis]. Moscow, MISIS Publ., 1994. 328 p.
11. Mashina X4-B ispytatelnaya ustanovka dlya issledovaniya iznashivaniya materialov zakreplennym abrazivom [Machine X4-B test unit for testing the wear of materials with fixed abrasive]. Slovar-spravochnik po treniyu, iznosu i smazke detaley mashin [Dictionary-reference on friction, wear and lubrication of machine parts]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1979. 185 p.
12. **Tenenbaum M.M.** Zakonomernosti abrazivnogo iznashivaniya detaley rabochix organov selskoxozyaystvennykh mashin [Patterns of abrasive wear of parts of working bodies of agricultural machines]. *Treniya i iznos = Friction and wear*, 1980, vol. 1, no 2, pp. 357–364.
13. **Garkunov D.N.** *Tribotexnika* [Tribotechnika]. Moscow, Izd-vo MSXA Publ., 2005. 356 p.