

УДК 621.17

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2020.88.1.46

РОЗРОБЛЕННЯ РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТАЛІ 16ХЗНВФМБ-Ш ДЛЯ ОТРИМАННЯ НИЗЬКОЇ ТВЕРДОСТІ

Реброва О.М., Протасенко Т.О., Шевченко С.М., Князєв С.А.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Анотація. У статті запропоновано технологію термічного оброблення конструкційної комплексно-легованої теплостійкої сталі 16ХЗНВФМБ-Ш для отримання структури, яка забезпечує досить низьку твердість для подальшого механічного оброблення різанням.

Ключові слова: термічне оброблення, структура сталі, твердість.

Вступ

У сучасних умовах автоматизованого виробництва виникає необхідність забезпечення високої оброблюваності сталей різанням, а також стійкості різального інструмента. Для виконання цієї вимоги необхідно мати на увазі, що в разі відпалювання на мінімальну міцність не у всіх випадках досягаються оптимальні умови для різання. Це пов'язано з тим, що під оброблюваністю різанням розуміють цілий комплекс властивостей і вимог. Залежно від методу механічного оброблення особливе значення надається стійкості інструмента, утворенню стружки, витратам енергії, а також якості поверхні.

Серед факторних величин, що визначаються власне матеріалом, більше значення надається утворенню певної структури сталі, ніж її твердості й міцності. Необхідність поліпшення якості поверхні особливо важлива в разі малих швидкостей різання (наприклад, різання з уповільненим утворенням стружки). Якість поверхні в цьому випадку тим вища, чим менша в'язкість сталі, яка, як правило, зменшується за умови крупнозернистій структурі й утворенні зернистої будови карбідної фази.

Тому, з огляду на той факт, що висока оброблюваність різанням містить комплекс властивостей і вимог до матеріалу, необхідним є підбір технології термічного оброблення сталі для отримання заданої твердості та структури.

Аналіз публікацій

Конструкційна комплексно-легована теплостійка сталь 16ХЗНВФМБ-Ш завдяки своїм високим експлуатаційним характеристикам почала використовуватися в деталях машин, зокрема в авіаційному двигунобуду-

ванні [1–3]. У науковій літературі, зазвичай, вивчають перспективи застосування для зміцнення сталі 16ХЗНВФМБ-Ш комплексного хіміко-термічного оброблення, що складається з різних варіантів насичення вуглецем (вакуумного) й азотом (вакуумного або іонно-плазмового) [4–10]. Але це дослідження присвячено досягненню певної твердості та відповідної структури для забезпечення якісного оброблення різанням, зокрема довбанням, та високої стійкості різального інструмента. На сьогодні відсутня інформація щодо технології термічного оброблення комплексно-легованої теплостійкої сталі 16ХЗНВФМБ-Ш для отримання структури, яка забезпечує досить низьку твердість для подальшого механічного оброблення різанням. Тому обраний напрям дослідження є актуальним та має науково-практичну цінність для підприємств, що випускають агрегати до авіаційних двигунів, зокрема й газотурбінних.

Мета і постановка завдання

Метою цієї роботи є розроблення технології термічного оброблення конструкційної комплексно-легованої теплостійкої сталі 16ХЗНВФМБ-Ш для отримання структури, яка забезпечує досить низьку твердість для подальшого механічного оброблення різанням, зокрема довбанням. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- установити вплив температури відпуску й часу витримки на структуру та властивості сталі;
- визначити залежність твердості сталі 16ХЗНВФМБ-Ш від температури відпуску;
- запропонувати режими термічного оброблення, які забезпечують отримання структури з необхідною для механічного оброблення різанням твердістю (22–26 HRC).

Результати дослідження та їх обговорення

Для забезпечення оброблюваності різанням необхідна відповідна твердість і структура сталі 16Х3НВФМБ-Ш.

У процесі термічного оброблення сталі згідно з режимом: нагрів до температур 910–930 °С з подальшим охолодженням у маслі, забезпечується отримання бейнітної структури з виділенням зернистих карбідів з твердістю 40 HRC (рис. 1, а). Після проведення відпуску за умови температури 680 °С протягом 3 год твердість знижується до 22–26 HRC, у цьому випадку структура зберігає бейнітний характер (рис. 1, б). Однак практика показує,

що, незважаючи на низьку твердість, оброблення різанням, зокрема довбанням, відбувається незадовільно. У зв'язку з цим для вивчення кінетики зміни твердості дослідні зразки піддавалися обробленню за режимами: нагрів 920 °С з витримкою 0,5 год з подальшим гартуванням у маслі й відпуском за умови температур: 400, 450, 500, 550, 600, 650, 680, 700, 750 °С протягом 3 год.

Проведені дослідження показали, що необхідна твердість сталі 16Х3НВФМБ-Ш забезпечується після нагрівання до 920 °С і охолодження в маслі з подальшим відпуском в інтервалі температур 650–700 °С (табл. 1).

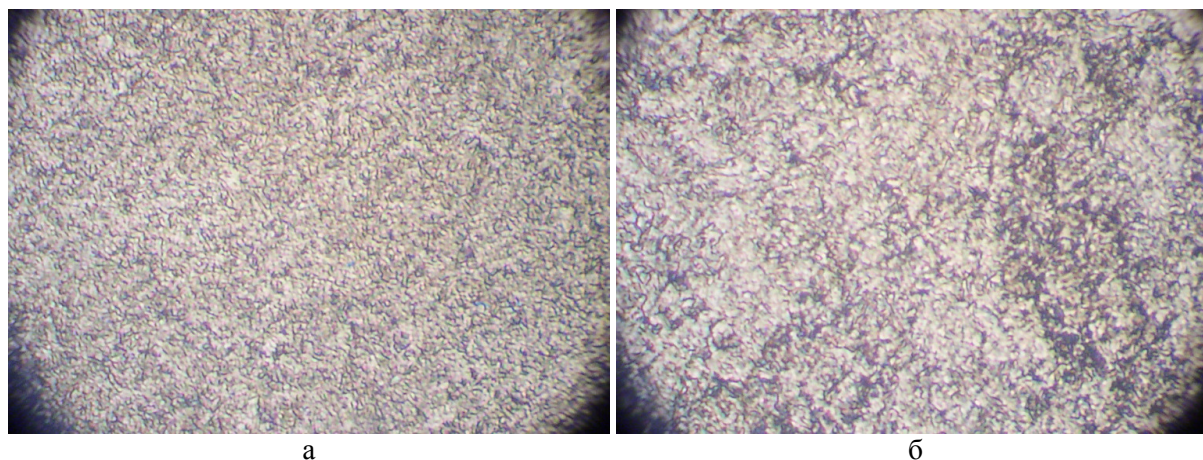


Рис. 1. Структура сталі 16Х3НВФМБ-Ш ($\times 360$): а – після гартування за умови 910–930 °С з охолодженням в маслі; б – після відпуску в разі 680 °С ($\tau = 3$ год)

Таблиця 1 – Твердість сталі 16Х3НВФМБ-Ш за умови різних температур відпуску

№ зразка	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_{\text{відп}}, ^\circ\text{C}$	400	450	500	550	600	650	680	700	750
HRC	40	40	40	40	32	25	21	20	15

Однак, у цьому випадку в усіх випадках зберігається бейнітна спрямованість структури з виділенням зерен карбідів. Підвищення температури відпуску до 750 °С призводить до зменшення розміру карбідів унаслідок їх розчинення, що сприяє зниженню твердості.

Задовільну оброблюваність забезпечують структури, які отримані в процесі ізотермічного розпаду аустеніту в перлітній ділянці та структури, отримані після відпуску мартенситу поблизу субкритичних температур.

Проведене термічне оброблення згідно з режимом: нагрів до 920 °С, витримка 0,5 год і перенесення в піч з температурою 650–700 °С і витримкою 1 год, дозволяє отримати структуру типу сорбіт з дрібними сфероїдизованими карбідами з твердістю 25–35 HRC (рис. 2, а).

Треба зазначити, що відпалювання сталі 16Х3НВФМБ-Ш за умови температури 700 °С не призводить до повного перлітного перетворення й частина аустеніту перетворюється в бейніт, що супроводжується збільшенням твердості до 35 HRC (рис. 2, б).

Досліджувана сталь належить до бейнітного класу, оскільки в разі охолодження в маслі та на повітрі набуває бейнітного характеру з твердістю до 40 HRC.

Гартування в маслі з подальшим відпуском на 700–750 °С хоча й не відрізняється за твердістю від гартування у воді, проте призводить до формування структури бейнітного характеру. Однак у процесі довбання така структура ускладнює оброблюваність.

Охолодження у воді призводить до утворення структури мартенсит з твердістю до 45 HRC.

Відпуск за умови температури 750 °C протягом 1 год формує структуру сорбіт відпуску з твердістю 18 HRC (рис. 3, а). Відпуск у разі температура 600–650 °C забезпечує твердість 20–28 HRC (рис. 3, б).

Варто зазначити, що низька твердість мартенситу не призводить до утворення тріщин, навіть на готових виробах з гострими гранями. У місцях надрізів тріщин не виявлено.

Таким чином, унаслідок проведених досліджень нами були отримані дані щодо твердості зразків зі сталі 16ХЗНВФМБ-Ш залежно від різних режимів термічного оброблення, які представлені в табл. 2.

Проаналізувавши результати проведених досліджень для поліпшення оброблюваності

довбанням сталі 16ХЗНВФМБ-Ш, можна запропонувати два режими, що дозволяють отримати структури з необхідною для оброблюваності різанням твердістю.

Як показує практика, з точки зору технологічних властивостей сталей бейнітного класу типу 16ХЗНВФМБ-Ш оптимальною твердістю для оброблення різанням є 22–26 HRC, що досягається за умови нагріву до температури 920 °C з подальшою витримкою 30 хв та ізотермічному відпалюванні в разі температури 600–650 °C упродовж 60 хв (табл. 3, режим I).

Альтернативним варіантом можна запропонувати гартування з високим відпуском: нагрів до температури 920 °C з подальшою витримкою 30 хв, охолодження у воді та подальший відпуск за умови температури 650–700 °C упродовж 60 хв (табл. 3, режим II).

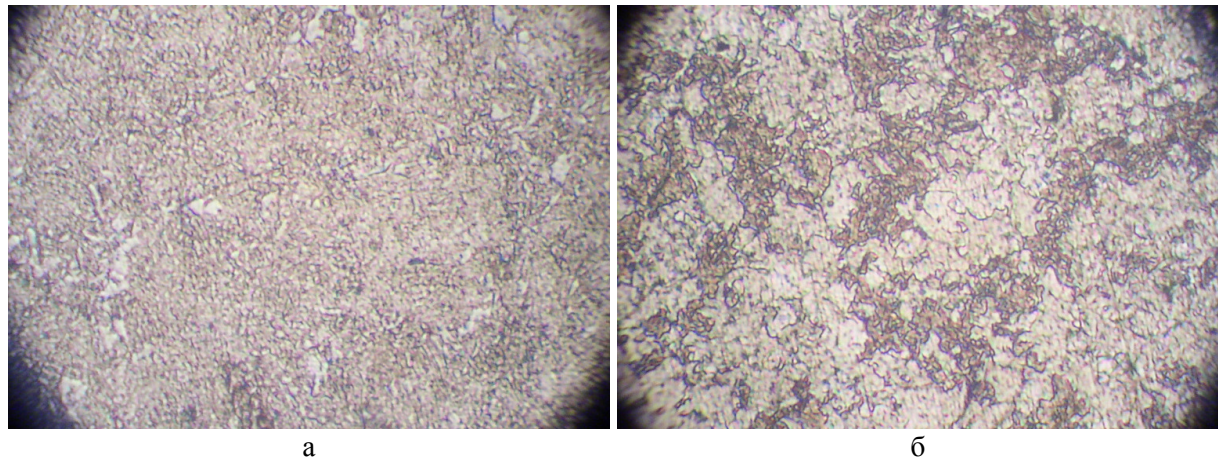


Рис. 2. Структура сталі 16ХЗНВФМБ-Ш ($\times 360$) після нагріву до 920 °C і подальшого перенесення в піч: а – $t_{\text{печі}} = 650$ °C; б – $t_{\text{печі}} = 700$ °C

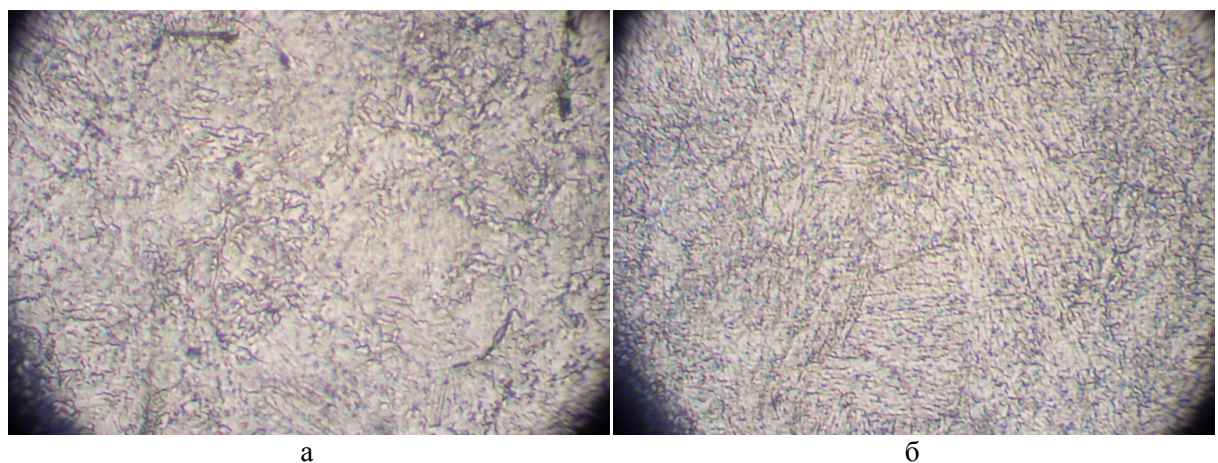


Рис. 3. Структура сталі 16ХЗНВФМБ-Ш ($\times 360$) після загартування за умови 920 °C і охолодження у воді з подальшим відпуском: а – $t_{\text{відп}} = 750$ °C; б – $t_{\text{відп}} = 600\text{--}650$ °C

Таблиця 2 – Режими термічного оброблення зразків зі сталі 16ХЗНВФМБ-Ш та їх твердість

№ з/п	№ зраз-ка	t _{гарт} , °C	τ _{витр} , хв	Охолод. середови-ще	t _{відп} , °C	τ _{витр} , хв	Охолод. середовище	HRC		
1	1	920	30	Масло	700	180	Повітря	20		
2	2	920	30	Вода	—			41		
3	3	920	30	Масло	400	180	Повітря	40		
4	4				450			40		
5	5				500			40		
6	6				550			40		
7	7				600			33		
8	8				650			25		
9	9				680			21		
10	1				700			20		
11	10				750			15		
12	11	Ізотерма: t = 920 °C, τ _{витр} = 30 хв, перенесення в піч t = 650 °C, τ _{витр} = 60 хв, охолодження – повітря						25		
13	12	Ізотерма: t = 920 °C, τ _{витр} = 30 хв, перенесення в піч t = 700 °C, τ _{витр} = 60 хв, охолодження – повітря						35		
14	13	920	30	Вода	700	60	Повітря	24		
15	14				750			18		
16	15			Масло	700			25		
17	16				750			18		
18	17	Вихідний зразок						~ 10		
19	18	920	30	Масло	—			39		
20	19			Повітря	—			38		

Таблиця 3 – Рекомендовані режими термічного оброблення сталі 16ХЗНВФМБ-Ш

Рекомендований режим	Нагрівання, $^\circ\text{C}$	Витримка, хв	Охолод. середовище	Температура ізотерми або відпуску	Витримка, хв	HRC
Режим I	920	30	ізотерма	600–650	60	22–28
Режим II	920	30	вода	650–700	60	22–26

Висновки

1. Загартування сталі 16ХЗНВФМБ-Ш у маслі з подальшим відпуском на $700\text{--}750 ^\circ\text{C}$ не дає суттєвих відмінностей за твердістю від загартування у воді, проте приводить до формування структури бейнітного типу. Однак у разі довбання така структура ускладнює оброблюваність.

2. Охолодження у воді призводить до утворення структури мартенсит з твердістю до 45 HRC. Відпуск за умови температури $750 ^\circ\text{C}$ протягом 1 год формує структуру сорбіт відпуску з твердістю 18 HRC. Але така структура не забезпечує якісного оброблення різанням.

3. Результати проведеного дослідження дають змогу визначити два основні режими термічного оброблення сталі 16ХЗНВФМБ-Ш, які дозволяють поліпшити оброблюваність. Запропоновані режими забезпечують отримання структури з необхідною для оброблюваності різанням твердістю 22–26 HRC.

Література

1. Фомина Л.П., Крымов В.В. Совершенствование технологий упрочнения зубчатых колес авиадвигателей // Двигатель: научно-технический журнал. – 2016. – № 2(104). – С. 6–8. – URL: <http://engine.aviaport.ru/issues/104/pics/pg06.pdf>
2. Демидов П.Н., Семенов М.Ю., Нелюб В.А. Оптимизация технологического процесса вакуумной цементации зубчатых колес из теплостойкой стали с целью повышения циклической прочности // Вестн. БГТУ. – 2013. – № 2(38). – С. 69–73.
3. Демидов П.Н., Семенов М.Ю., Нелюб В.А. Оптимальный выбор материала и способа поверхностного упрочнения высоконагруженных зубчатых колес с целью повышения сопротивления заеданию // Вестн. БГТУ. – 2012. – № 4. – С. 22–27.
4. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г. Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 518 с.
5. Перспективы использования эффекта полого катода при локальном азотировании деталей

- из стали 16ХЗНВФМБ-Ш / В.В. Будилов и др. // Вестник УГАТУ. – 2014. – Т. 18. – № 1. – С. 32–36.
6. Применение эффекта полого катода для локального ионного азотирования конструкционной стали 16ХЗНВФМБ-Ш / В.В. Будилов и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 12. – С. 27–30.
 7. Хусаинов Ю.Г. Исследование структуры, фазового состава и механических свойств поверхности сталей 16ХЗНВФМБ-Ш и 38ХМЮА при локальном азотировании в тлеющем разряде с полым катодом: дисс. кандидата технических наук: 05.16.01. – Уфа, 2015.
 8. Лашнев М.М., Семенов М.Ю., Смирнов А.Е. Оптимизация технологических факторов вакуумной нитроцементации комплексно легированной стали // Наука и образование (МГТУ им. Н.Э. Баумана). – 2012. – № 3. – URL: <http://technomag.edu.ru/doc/330997.html>.
 9. Рыжов Н.М., Смирнов А.Е., Фахуртдинов Р.С. Циклическая прочность стали 16ХЗНВФМБ (ВКС-5) после вакуумной цементации // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2010. – № 2. – С. 23–28.
 10. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 303 с.
- ### References
1. Fomina L.P., Kryimov V.V. Sovershenstvovanie tehnologiy uprochneniya zubchatykh kolez aviadvigateley [Improving the technology of hardening the gears of aircraft engines] // Engine: Scientific and Technical Journal. – 2016. – № 2(104). – S. 6–8. – URL: <http://engine.aviaport.ru/issues/104/pics/pg06.pdf>
 2. Demidov P.N., Semenov M.Yu., Nelyub V.A. Optimizatsiya tehnologicheskogo protsessa vakuumnoy tsementatsii zubchatykh kolez iz teplostoykoy stali s tselyu povysheniya tsiklicheskoy prochnosti [Optimization of the technological process of vacuum cementation of gear wheels made of heat-resistant steel in order to increase the cyclic strength] // Vestn. BGUTU. – 2013. – № 2(38). – S. 69–73.
 3. Demidov P.N., Semenov M.Yu., Nelyub V.A. Optimalnyiy vyibor materiala i sposoba poverhnostnogo uprochneniya vyisokonagruzhennykh zubchatykh kolez s tselyu povysheniya soprotivleniya zaedaniyu [The optimal choice of material and method of surface hardening of highly loaded gears in order to increase resistance to seizing] // Vestn. BGUTU. – 2012. – № 4. – S. 22–27.
 4. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G. Struktura i iznosostoykost azotirovannykh konstruktsionnykh staley i splavov [Structure and wear resistance of nitrided structural steels and alloys]. – Moskva: MGUTU im. N.E. Bauman, 2012. – 518 s.
 5. Perspektivy ispolzovaniya effekta pologo katoda pri lokalnom azotirovani detaley iz stali 16H3NVFMB-Sh [Prospects for using the hollow cathode effect for local nitriding of parts made of 16Kh3NVFMB-Sh steel] / V.V. Budilov, K.N. Ramazanov, Yu.G. Husainov, I.V. Zolotov // Vestnik UGATU. – 2014. – Т. 18. – № 1. – S. 32–36.
 6. Primenenie effekta pologo katoda dlya lokalnogo ionnogo azotirovaniya konstruksionnoy stali 16H3NVFMB-Sh [Application of the hollow cathode effect for local ion nitriding of structural steel 16Kh3NVFMB-Sh] / V.V. Budilov, K.N. Ramazanov, I.V. Zolotov, Yu.G. Husainov // Uprochnyayushchie tehnologii i pokryitiya. – 2014. – № 12. – S. 27–30.
 7. Husainov Yu.G. Issledovanie struktury, fazovogo sostava i mehanicheskikh svoystv poverhnosti staley 16H3NVFMB-Sh i 38HMYuA pri lokalnom azotirovani v tleyuschem razryade s polyim katodom [Investigation of the structure, phase composition, and mechanical properties of the surface of 16Kh3NVFMB-Sh and 38KhMYuA steels during local nitriding in a glow discharge with a hollow cathode]: diss. kandidata tehnikeskikh nauk: 05.16.01. – Ufa, 2015.
 8. Lashnev M.M., Semenov M.Yu., Smirnov A.E. Optimizatsiya tehnologicheskikh faktorov vakuumnoy nitrotssementatsii kompleksno legirovannoy stali [Optimization of technological factors of vacuum nitrocarburizing of complex alloy steel] // Nauka i obrazovanie (MGUTU im. N.E. Bauman). – 2012. – № 3. – URL: <http://technomag.edu.ru/doc/330997.html> (accessed: 10 September 2019).
 9. Ryzhov N.M., Smirnov A.E., Fakhurtdinov R.S. Tsiklicheskaya prochnost stali 16Kh3NVFMB (VKS-5) posle vakuumnoy tsementatsii [The cyclic strength of steel 16H3NVFMB (VKS-5) after vacuum cementation] // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. – 2010. – № 2. – S. 23–28.
 10. Zinchenko V.M. Inzheneriya poverkhnosti zubchatykh kolez metodami khimiko-termicheskoy obrabotki [Gear surface engineering using chemical heat treatment methods]. – Moskva: MGUTU im. N.E. Bauman. – 2001. – 303 s.
- Реброва Олена Михайлівна**, к.т.н., доцент кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707-64-35, e-mail: rebrovaem0512@gmail.com, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2, вул. Кирпичова, м. Харків, 61002, Україна.
- Протасенко Тетяна Олександрівна**, доцент кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707-64-35, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2, вул. Кирпичова, м. Харків, 61002, Україна.
- Шевченко Світлана Михайлівна**, старший викладач кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707-64-35, e-mail: svsshev970819@gmail.com,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2, вул. Кирпичова, м. Харків, 61002, Україна.

Князев Сергій Анатолійович, інженер кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707-64-35, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2, вул. Кирпичова, м. Харків, 61002, Україна.

Developing the heat treatment modes of 16H3NVFMB-Sh steel for getting low hardness

Abstract. The article proposes the technology of heat treatment of structural complex-alloy heat-resistant steel 16H3NVFMB-Sh to obtain a structure that provides a sufficiently low hardness for further machining by cutting. **Problem.** Due to automated production, there is a need to ensure high machinability of steel by cutting, as well as the durability of the cutting tool. To fulfill this requirement, it must be borne in mind that when annealing to a minimum strength, optimal cutting is not always achieved. Among the factor quantities that are determined by the material itself, greater importance is attached to the formation of a certain steel structure than hardness and strength. **The goal** of this work is to develop a heat treatment technology for structural complex of alloyed heat-resistant research steel to obtain a structure that provides a sufficiently low hardness for further machining by cutting. **Methodology.** To study the kinetics of changes in hardness, the experimental samples were processed according to the modes: heating at 920°C for 0.5 hours, followed by quenching in oil and tempering at temperatures of 400–750°C within 3 hours. **Results.** Water quenching leads to the formation of a martensite structure with a hardness of up to 45 HRC. Vacation at a temperature of 750°C for an hour forms the structure of sorbitol tempering with a hardness of 18 HRC. But such a structure does not provide high-quality machining. **Originality.** The results of the study made it possible to determine the heat treatment conditions of research steel, which allow it to be easily processed by cutting. **Practical value.** Heat treatment modes are proposed that provide a structure with a hardness of 22–26 HRC necessary for machinability.

Key words: heat treatment, steel structure, hardness.

Rebrova Olena Mykhailivna, Ph. D., Associate Professor of Materials Science Department, tel.: (057) 707-64-35, e-mail: rebrovaem0512@gmail.com, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Protasenko Tetiana Oleksandrivna, Associate Professor of Materials Science Department,

tel.: (057) 707-64-35, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Shevchenko Svitlana Mykhailivna, Senior Lecturer of Materials Science Department, tel.: (057) 707-64-35, e-mail: svsshev970819@gmail.com, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Kniaziev Serhii Anatoliiovych, engineer of Materials Science Department, tel.: (057) 707-64-35, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Разработка режимов термической обработки конструкционной стали 16Х3НВФМБ-Ш для получения низкой твердости

Аннотация. В статье предложена технология термической обработки конструкционной комплексно-легированной теплостойкой стали 16Х3НВФМБ-Ш для получения структуры, обеспечивающей достаточно низкую твердость для дальнейшей механической обработки резанием.

Результаты проведенного исследования позволяют определить два основных режима термической обработки стали 16Х3НВФМБ-Ш, которые дают возможность улучшить обрабатываемость. Предложенные режимы обеспечивают получение структуры с необходимой для обрабатываемости резанием твердостью 22–26 HRC.

Ключевые слова: термическая обработка, структура стали, твердость.

Реброва Елена Михайловна, к.т.н., доцент кафедры материаловедения, тел.: (057) 707-64-35, e-mail: rebrovaem0512@gmail.com, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 2, ул. Кирпичёва, г. Харьков, 61002, Украина.

Протасенко Татьяна Александровна, доцент кафедры материаловедения, тел.: (057) 707-64-35, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 2, ул. Кирпичева, г. Харьков, 61002, Украина.

Шевченко Светлана Михайловна, старший преподаватель кафедры материаловедения, тел.: (057) 707-64-35,

e-mail: svsshev970819@gmail.com, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 2, ул. Кирпичева, г. Харьков, 61002, Украина.

Князев Сергей Анатольевич, инженер кафедры материаловедения, тел.: (057) 707-64-35, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 2, ул. Кирпичева, г. Харьков, 61002, Украина.